



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY**

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

**ŘÍZENÍ LINEÁRNÍHO POHONU HIWIN POMOCÍ NI  
SOFTMOTION**

CONTROL OF LINEAR DRIVE HIWIN BY NI SOFTMOTION

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Marek Sabó**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Pavel Houška, Ph.D.**

**BRNO 2017**



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automatizace a informatiky  
Student: **Marek Sabó**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Aplikovaná informatika a řízení  
Vedoucí práce: **Ing. Pavel Houška, Ph.D.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Řízení lineárního pohonu HIWIN pomocí NI SoftMotion

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá problematikou řízení lineárních pohonů na platformě NI Compact RIO pomocí modulu NI SoftMotion. Jedná se o lineární pohon LMS13, frekvenční měnič D1N, potřebnou mechaniku a senzorka. Propojení měniče D1N s NI cRIO je realizováno po sběrnici EtherCAT. Měnič D1N není přímo v NI SoftMotion podporován a cílem práce je chybějící podporu doplnit.

### Cíle bakalářské práce:

1. Seznamte se s pohonem HIWIN dostupným v laboratoři;
2. Seznamte se komunikačním protokolem EtherCAT a modulem NI SoftMotion;
3. Provedte oživení pohonu včetně nastavení regulace;
4. Realizujte propojení řídicí jednotky pohonu s NI cRIO pomocí sběrnice EtherCAT;
5. Navrhněte a realizujte řízení osy na NI cRIO pomocí NI SoftMotion a verifikujte přesnost pohybu.

### Seznam literatury:

SHELL, R. L. a HALL, E. L. Handbook of industrial automation. New York: M. Dekker, c2000, xii, 900 p. ISBN 0-8247-0373-1.

PAVELKA J., ČEŘOVSKÝ Z., JAVŮREK J.: Elektrické pohony, Nakladatelství ČVUT, Praha 2003.

Dokumentace LabVIEW a SoftMotion [online] Dostupná na <http://www.ni.com>.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Táto práca sa zaoberá problematikou riadenia trojfázového lineárneho synchronného motora od spoločnosti HIWIN pomocou modulu NI SoftMotion a frekvenčného meniča D1-N na platforme NI Compact RIO. V úvodnej časti je analyzovaná klasifikácia lineárnych motorov, princíp funkčnosti lineárnych synchronných motorov, popis zbernice EtherCAT a modulu NI SoftMotion. Ďalej sa práca venuje použitému hardvér, jeho parametrom, konfigurácii a nastavením regulácie pohonu. Záverečná časť je zameraná na návrh a realizáciu riadenia osi a verifikáciu presnosti pohybu.

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the control of HIWIN three-phase linear synchronous motor using NI SoftMotion and frequency inverter D1-N on the NI Compact RIO platform. In the introductory section is discussed the classification of linear motors, the principle of functionality of linear synchronous motors, described the fieldbus EtherCAT and the NI SoftMotion module. Further work is dedicated to the hardware used, its parameter, configuration and the regulation of drive control. The final part focuses on the design and implementation of axis control and movement accuracy verification.

## **KĽÚČOVÉ SLOVÁ**

Trojfázový lineárny synchronný motor s permanentnými magnetmi, zbernica EtherCAT, NI SoftMotion, regulácia, ladenie, riadenie lineárneho motora

## **KEYWORDS**

Three phase linear synchronous motor with permanent magnets, fieldbus EtherCAT, NI SoftMotion, regulation, tuning, control of linear drive



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

SABÓ, M. *Řízení lineárního pohonu HIWIN pomocí NI SoftMotion*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Houška, Ph.D.





## **POĎAKOVANIE**

Týmto by som sa chcel poďakovať Ing. Pavlovi Houškovi, Ph.D. za odborné vedenie bakalárskej práce, ale aj za ochotu, cenné rady, trpezlivosť a v neposlednom rade čas, ktorý mi venoval pri tvorbe tejto bakalárskej práce. Moja vďaka patrí aj kolegom z doktorského a magisterského štúdia, ktorí sú pod vedením pána Ing. Pavla Houšku, Ph.D.



## **ČESTNÉ PREHLÁSENIE**

Prehlasujem, že táto práca je mojim pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne s použitím literatúry uvedenej v zozname a pod vedením Ing. Pavla Houšku Ph.D.

V Brne dňa 27. 5. 2017

.....

Marek Sabó



## OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>LINEÁRNE POHONY .....</b>	<b>17</b>
2.1	Delenie lineárnych elektrických motorov .....	18
2.2	Lineárny synchronný motor s PM .....	19
2.3	Nežiaduca prídržná sila .....	21
<b>3</b>	<b>KOMUNIKAČNÁ ZBERNICA ETHERCAT .....</b>	<b>23</b>
3.1	Protokol .....	23
3.2	Komunikácia.....	24
3.2.1	Mailbox služby .....	24
3.2.2	CANopen over EtherCAT .....	24
<b>4</b>	<b>MODUL NI SOFTMOTION .....</b>	<b>27</b>
4.1	Komponenty NI SoftMotion.....	27
4.1.1	NI Scan Engine .....	28
4.2	Zdroje pohybu (Motion Resources).....	28
4.3	Referencie pohybu .....	28
4.4	Express VI a funkčné bloky.....	29
4.5	Metódy a vlastnosti.....	30
<b>5</b>	<b>POUŽITÝ HARDVÉR .....</b>	<b>31</b>
5.1	Lineárna os HIWIN LMU160 .....	31
5.1.1	Lineárny motor LMS13 .....	31
5.1.2	Odmeriavanie.....	32
5.1.3	Koncové spínače.....	33
5.2	Frekvenčný menič HIWIN D1-N .....	34
5.3	NI CompactRIO-9022 .....	35
<b>6</b>	<b>KONFIGURÁCIA POHONU A NASTAVENIE REGULÁCIE .....</b>	<b>37</b>
6.1	Konfigurácia .....	37
6.2	Základné nastavenie regulácie.....	39
6.3	Ladenie kontroléra .....	42
6.4	Dodatočné ladenie .....	43
<b>7</b>	<b>REALIZÁCIA RIADENIA POHONU .....</b>	<b>45</b>
7.1	Konfigurácia projektu LabVIEW .....	45
7.2	Programová časť riadenia pohonu .....	45
7.3	Verifikácia presnosti pohybu.....	47
<b>8</b>	<b>ZÁVER .....</b>	<b>49</b>
<b>9</b>	<b>ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY.....</b>	<b>51</b>
<b>10</b>	<b>ZOZNAM PRÍLOH.....</b>	<b>53</b>



# 1 ÚVOD

Lineárne pohony a ich riadenie patrí v súčasnej dobe medzi veľmi významnú súčasť automatizácie. V súčasnosti sú to hlavne lineárne motory, ktoré pomaly vytlačujú rotačné motory v množstve aplikácií, pretože ponúkajú lepšie vlastnosti, a to hlavne v presnosti a dynamike. Táto práca sa zaoberá problematikou riadenia lineárneho pohonu na platforme NI Compact RIO pomocou modulu NI SoftMotion, ktorý je implementovaný vo vývojovom prostredí NI LabVIEW. Cieľom práce je rozšírenie poznatkov z oblasti lineárnych synchrónnych pohonov, zbernice EtherCAT, modulu NI SoftMotion, ich následné aplikovanie pri navrhnutí systému riadenia pohonu a doplnenie chýbajúcej podpory frekvenčného meniča D1-N v module NI SoftMotion.

V rešeršnej časti tejto práce je popísané členenie lineárnych motorov, princíp činnosti lineárnych synchrónnych motorov, ich stavba, výhody a nevýhody. Ďalej je vysvetlený princíp fungovania niektorých častí komunikácie EtherCAT, kde sa jedná najmä o implementáciu protokolu CANOpen over EtherCAT (CoE). Poslednou časťou rešerše je popis modulu NI SoftMotion, kde je rovnako vysvetlený princíp činnosti, architektúra, popis funkcií, ktoré obsahuje a ich použitie.

Ďalej sú v práci popísané vlastnosti a parametre použitých hardvérových častí celého riadiaceho aj riadeného systému, teda samotnej lineárnej osi, frekvenčného meniča, kontroléru cRIO a ich vzájomné prepojenie a funkcie, ktoré zastávajú v tomto systéme. Následne je podrobne popísaný proces konfigurácie a nastavenia regulácie pohonu. Nakoniec je v práci popísaná realizácia riadenia osi pomocou modulu NI SoftMotion a doplnená chýbajúca podpora frekvenčného meniča v tomto module.



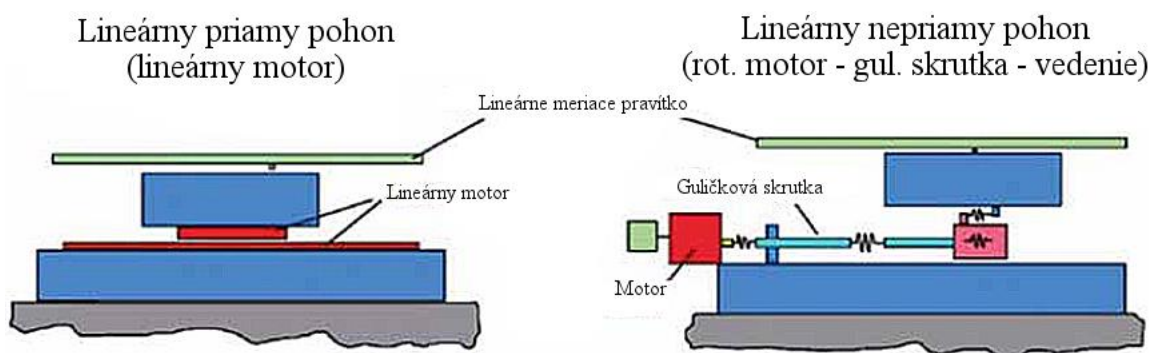


## 2 LINEÁRNE POHONY

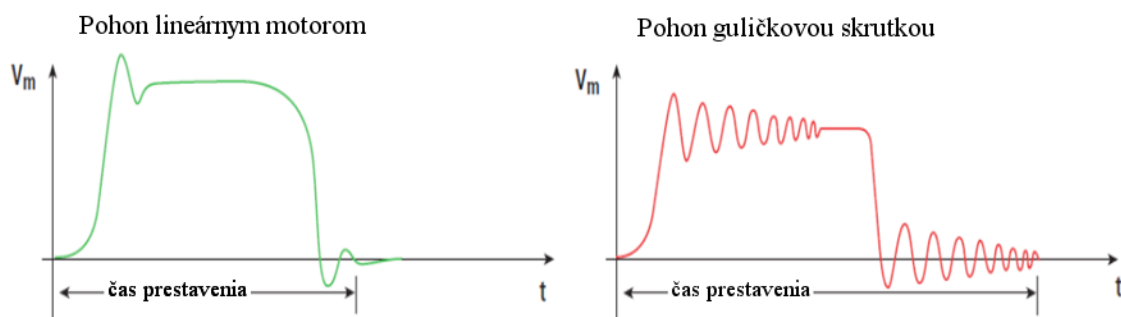
Lineárne elektrické pohony sú pohony, ktorých účelom je vykonávanie translačného pohybu premenou elektrickej energie na mechanickú prácu. Tento druh pohybu môže byť vykonávaný priamo alebo nepriamo, ako je to možné vidieť na obr. 1.

Nepriame lineárne pohony zastupujú elektrické točivé stroje, kde rotačný pohyb je prevedený na pohyb translačný pomocou rôznych druhov mechanických prevodov. Medzi tieto prevody patria hlavne pohybové skrutky, remene, hrebeňové prevody a šneky.

Zdrojom priamo vykonávaného translačného pohybu sú lineárne elektrické motory (LM). Ich nenahraditeľnosť motormi točivými spočíva hlavne v niektorých vlastnostiach, napríklad lepšia dynamika, presnosť či rýchlosť lineárneho posuvu. Na obr. 2 je možné vidieť rozdielnosť prechodového javu, teda reakciu na zmenu polohy priameho a nepriameho lineárneho pohonu. Priame pohony dosahujú kratších prechodových javov a rýchlejšieho ustálenia v žiadanej polohe s minimálnym prekmitom. Ďalšou nenahraditeľnou vlastnosťou je absencia mechanických prevodov, ktoré majú vplyv na presnosť, opotrebenie, ale aj na iné vlastnosti. Samozrejme LM nesú so sebou aj negatívne vlastnosti, ako sú vyššia zriaďovacia cena oproti nepriamym lineárnym pohonom alebo problematické napájanie jazdca.



Obr. 1: Priamy a nepriamy lineárny pohon [1]

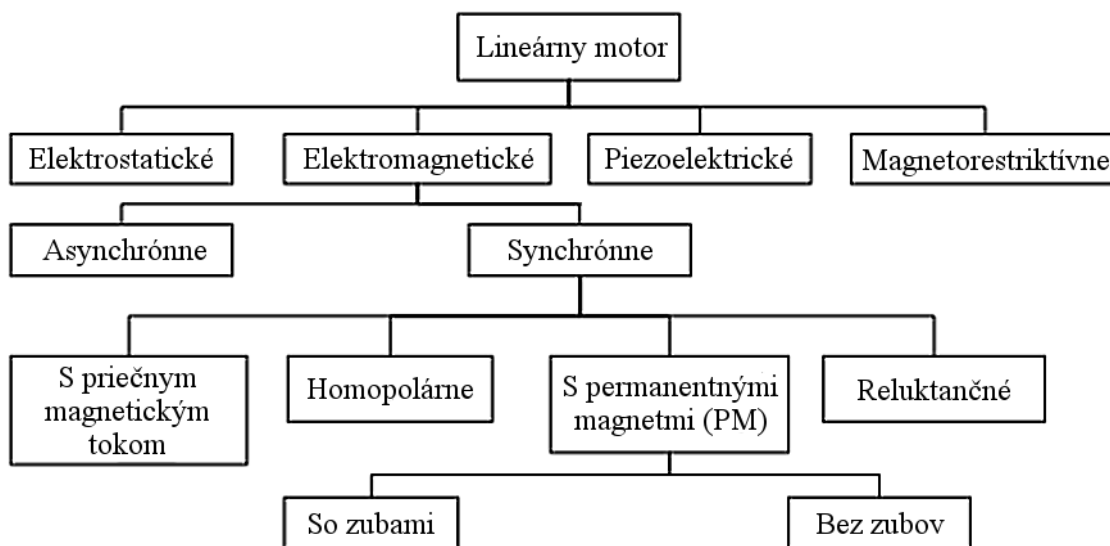


Obr. 2: Prechodový jav priameho a nepriameho lineárneho pohonu

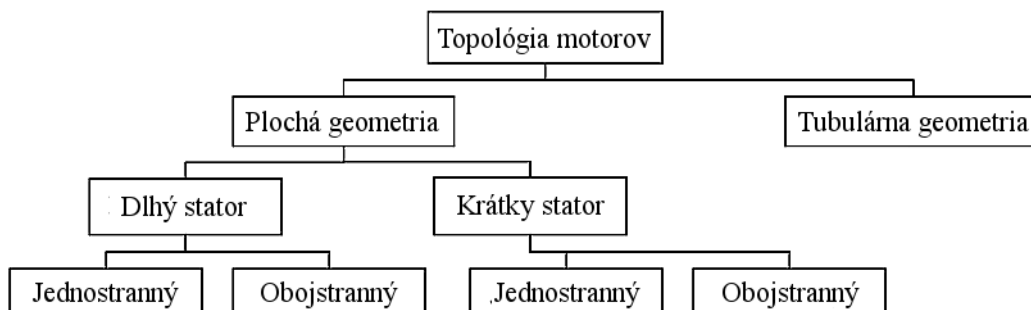
Základnými prvkami LM sú rovnako ako u rotačných motorov stator a rotor. Rozdielom je, že u rotačných motorov sa rotorom nazýva časť pohyblivá a statorom časť statická. U LM nazývame statorom časť, ktorá je aktívna, teda časť napájaná, nazývaná aj primárny diel alebo jazdec. Rotor je sekundárnym dielom, ktorý tvorí časť budiacu.

## 2.1 Delenie lineárnych elektrických motorov

Rozdelenie LM nie je štandardizované žiadnou organizáciou a ich triedenie a klasifikácia je individuálna od výrobcu. Podľa fyzikálneho princípu je možné deliť LM, ako je to uvedené na obr. 3 alebo podľa topológie, ktoré možno vidieť na obr. 4. Každý z týchto motorov má svoje výhody a nevýhody, ktoré definujú oblasti jeho použitia. Keďže sa táto práca zaoberá lineárnymi synchronnými motormi s permanentnými magnetmi (PM), nie sú ostatné typy motorov ďalej rozoberané. [2]



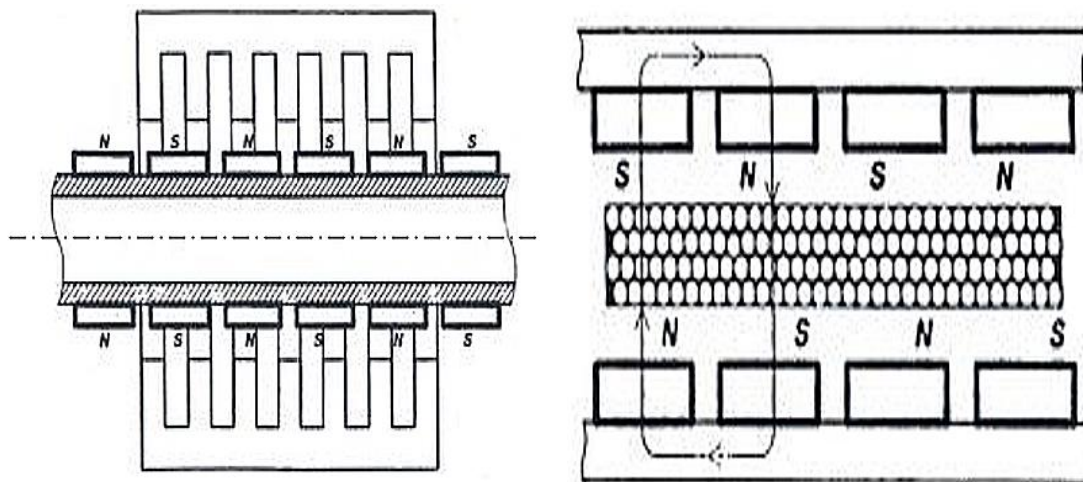
Obr. 3: Delenie lineárnych motorov podľa fyzikálneho princípu [3]



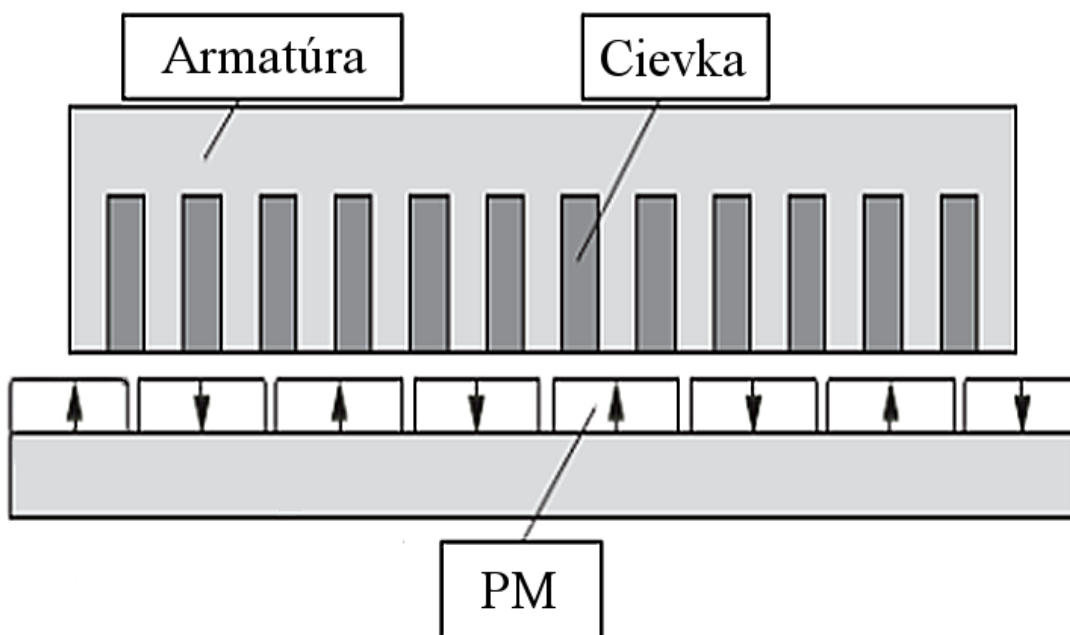
Obr. 4: Delenie lineárnych motorov podľa topológie [3]

Niektoré príklady motorov z vyššie uvedených klasifikácií sú uvedené na obr. 5 a 6. Rozdiel medzi motorom s krátkym a dlhým statorom spočíva v dĺžke napájanej

časti vzhľadom k časti budiacej. Motor s krátkym statorom má dĺžku napájanej časti kratšiu než dĺžku budiacej časti. To znamená, že napájaná je časť mobilná, teda jazdec. U motorov s dlhým statorom je to opačne. Výhodou krátkeho statora je možnosť ušetriť za vinutie, no problémom je naopak napájanie mobilnej časti, ktoré býva obvykle riešené použitím energetických reťazcov. [2]



Obr. 5: Tubulárny synchronný LM (vľavo), obojstranný LM s PM bez zubov a železného jadra (vpravo) [2]

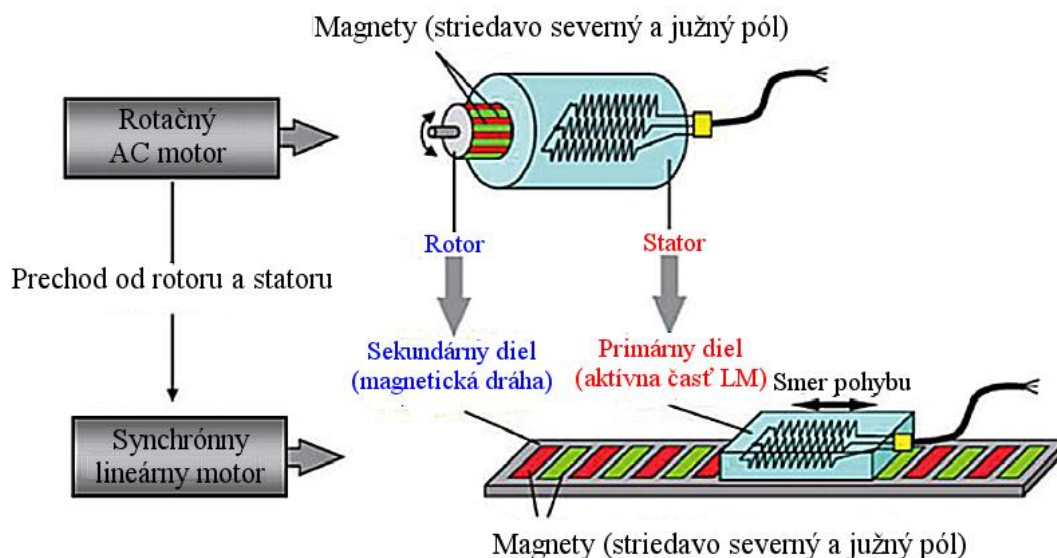


Obr. 6: Plochý synchronný LM so zubami a krátkym statorom [3]

## 2.2 Lineárny synchronný motor s PM

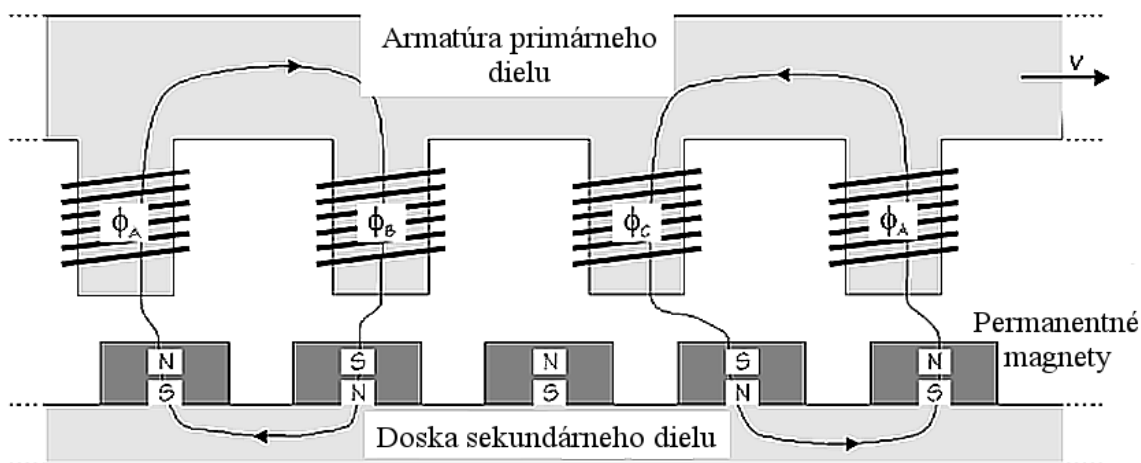
Lineárny motor pracuje na indukčnom princípe rovnako ako rotačný servomotor. Prechod od rotačného synchronného motora k lineárnemu znázorňuje obr. 7.

Primárna časť je tvorená rovnako feromagnetickým zväzkom zloženým z elektrotechnických plechov a trojfázového vinutia uloženého v jeho drážkach. Sekundárny diel sa skladá z permanentných magnetov, ktoré sú nalepené na oceľovej podložke a zaliate živicom. Privedením riadiaceho prúdu na primárnu časť (jazdec), vznikne magnetické pole medzi oboma dielmi a dôjde k pohybu jazdca. Úrovňou prúdu je možné ovládať rýchlosť a silu pohybu. [1]



Obr. 7: Porovnanie rotačného a lineárneho synchronného motora [1]

Aplikáciou trojfázového prúdu na susediace cievky primárneho dielu bude generovaná postupnosť príťažlivých a odpudivých síl medzi cievkami a permanentnými magnetmi (obr. 8). Výsledkom je pohyb primárneho dielu vzhľadom k sekundárnemu. Rýchlosť pohybu primárneho dielu a magnetického poľa je rovnaká, preto ju nazývame synchronná. [4]

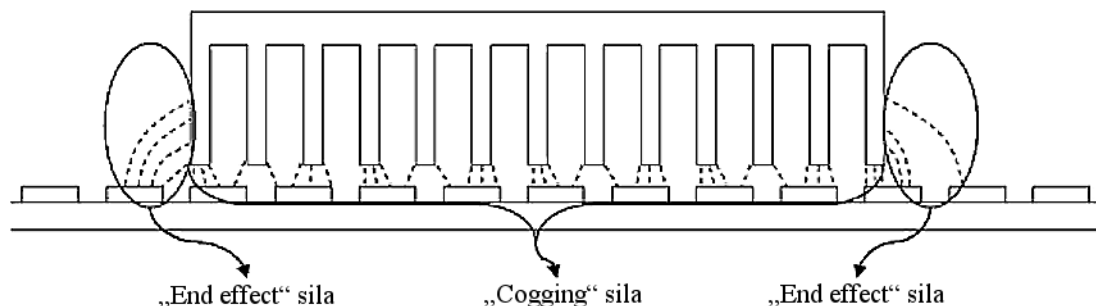


Obr. 8: Princíp LM s PM [4]

## 2.3 Nežiaduca prídržná sila

Táto nežiaduca sila pochádza z nevyváženej príťažlivej sily medzi armatúrou a permanentnými magnetmi, nezávisle na tom, či je práve privedený prúd do cievok armatúry alebo nie. Bežne je táto sila označovaná ako periodická funkcia vzhľadom k relatívnej pozícii medzi armatúrou a PM. Pri privedení riadiaceho prúdu na cievky armatúry je prirodzene táto sila pridaná k prídržnej, ktorá vznikne aplikovaním tohto prúdu. Toto spôsobuje nerovnomernosť ťažnej sily, a zároveň zhoršuje presnosť, s ktorou je možné riadiť pohon, najmä pri malých rýchlostiach, kde sa indukujú aj nežiaduce vibrácie a hluk. [5]

Táto sila sa skladá u synchronných LM s PM z „end effect“ a „cogging“ síl, znázornených na obr. 9. „End effect“ sila vzniká výhradne len pri LM s PM s krátkym statorom, elektromagnetickou interakciou medzi vonkajšími zubami armatúry a PM. Na druhej strane „cogging“ vzniká pri statore krátkom, ale aj dlhom, a to z dôvodu, že vzniká na vnútorných zuboch armatúry. [5]



Obr. 9: Pôsobenie nežiaducich prídržných síl [5]

„End effect“ silu je možné redukovať použitím vhodnej dĺžky statora a zrazením hrán vonkajších zubov. Naopak kompenzáciu „cogging“ sily je možné zabezpečiť rôznymi metódami, ako napríklad úpravou šírky zubov, zošíkmením PM, konštrukčným usporiadaním medzier medzi zubami a počtom PM. „Cogging“ je možné eliminovať úplne, a to odstránením jadier cievok, kde v praxi takýmto motorom hovoríme „air cored“, čo je možné preložiť ako „cievky so vzduchovým jadrom“. [5]

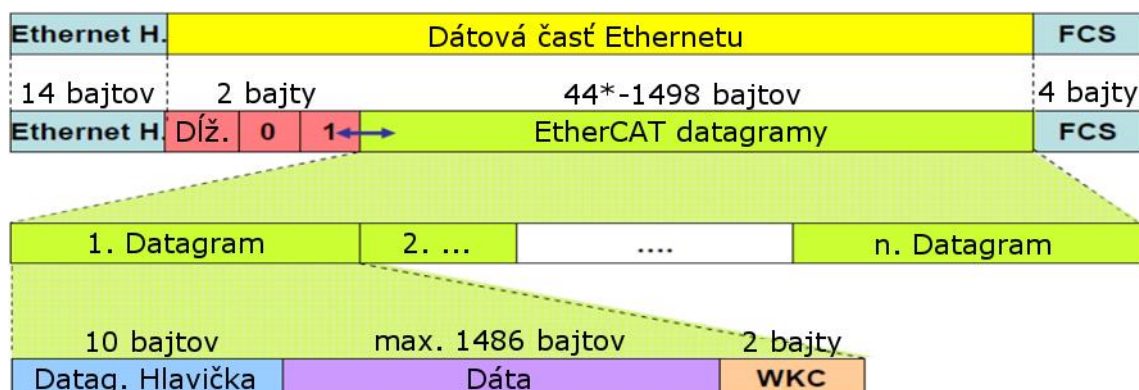


### 3 KOMUNIKAČNÁ ZBERNICA ETHERCAT

Táto zbernica bola uvedená na trh v roku 2003 firmou Beckhoff Automation. Z celého názvu „Ethernet for Controlling Automation Technology“ vyplýva, že jej základ je postavený na podstate komunikačnej zbernice Ethernet. Bola vyvinutá predovšetkým na aplikáciu v automatizácii, hlavne vylepšením časovania, a tým znížením časovej odozvy oproti Ethernetu, ktoré je v tomto odvetví nutné minimalizovať čo najviac. Protokol EtherCAT je špecifikovaný a integrovaný v štandardoch komunikačných protokolov IEC 61158 a IEC 61784. V rámci tejto práce budú popísané len nutné fakty o zbernici EtherCAT, ktoré sú potrebné pre túto bakalársku prácu. [6]

#### 3.1 Protokol

Komunikačný protokol je založený na štruktúre Ethernetového rámca, ktorý zapuzdruje rámce EtherCATu. EtherCAT rámec má indentifikátor 0x88A4h v poli EtherType. Začiatok rámca tvorí Ethernetová hlavička o veľkosti 14 bajtov, ktorá obsahuje MAC adresy a EtherType. Ďalej nasledujú 2 bajty doplnkových informácií ako dĺžka a iné. Koniec tohto rámca tvorí checksum o veľkosti 4 bajtov. Medzi týmito dátami sa nachádzajú samotné EtherCATové rámce, teda datagramy, ktoré sa inak nazývajú aj protokolové dátové jednotky (PDU). PDU sú zložené z hlavičky, samotných dát a Working Counteru. Hlavička datagramu obsahuje informáciu o type prístupu slave zariadenia k dátam (read, write, read-write) a spôsob adresovania daného slave zariadenia. Ethernetový rámec obsahuje určitý počet datagramov a každý z nich môže byť adresovaný inému slave zariadeniu. Samotné datagramy na seba nadväzujú bez interných medzier a majú konštantnú veľkosť. V prípade, že posledný datagram nemá požadovanú veľkosť, je na túto veľkosť doplnený. [6]



Obr. 10: Štruktúra rámcu EtherCAT [6]



## 3.2 Komunikácia

SyncManager slúži na ochranu sekcie pamäti DPRAM slave zariadenia pred simultánnym prístupom master a slave. Zabezpečuje konzistenciu dát a komunikáciu medzi master a slave zariadeniami. Môže fungovať v režimoch buffer a mailbox. [7]

**Buffer režim** zabezpečuje neustály prísun a prístup k najnovším dátam. Master zariadeniu je umožnené zapisovať dáta častejšie, ako sú čítané, a v tomto prípade sa pôvodné prepisujú novými. Slave zariadenie číta vždy konzistentné dáta z bufferu. Využívaný býva najmä na cyklické odosielanie dát malých objemov, ako napríklad procesné dáta. [7]

**Mailbox režim** podporuje „handshake“ mechanizmus, ktorý je vhodný najmä pre odosielanie konfiguračných dát, parametrov a iné. Tento mechanizmus spočíva v striedaní prístupu k dátam medzi master a slave zariadeniami. V prípade, že master je na rade s prácou s dátami a má pridelený zápis, nie je umožnená slave zariadeniu žiadna manipulácia s dátami, až pokiaľ master neukončí svoj prístup k pamäti. Následne je povolená slave zariadeniu operácia čítania. Pre mailbox režim sú rezervované 2 kanály SyncManageru a to SyncManager 0 a 1. Prvý slúži pre komunikáciu smerom od master k slave zariadeniu, druhý je využívaný v opačnom smere. [7]

### 3.2.1 Mailbox služby

Zásadnou výhodou využitia mailboxového režimu je schopnosť viac protokolovej komunikácie. Z princípu je implementácia ďalšieho protokolu do EtherCATu obdobná, ako zapuzdrenie rámca EtherCAT do dátového prvku Ethernetu. Teda rámec ďalšieho protokolu je zapuzdrený do dátovej časti EtherCATu. Možno je zavedenie nasledujúcich protokolov:

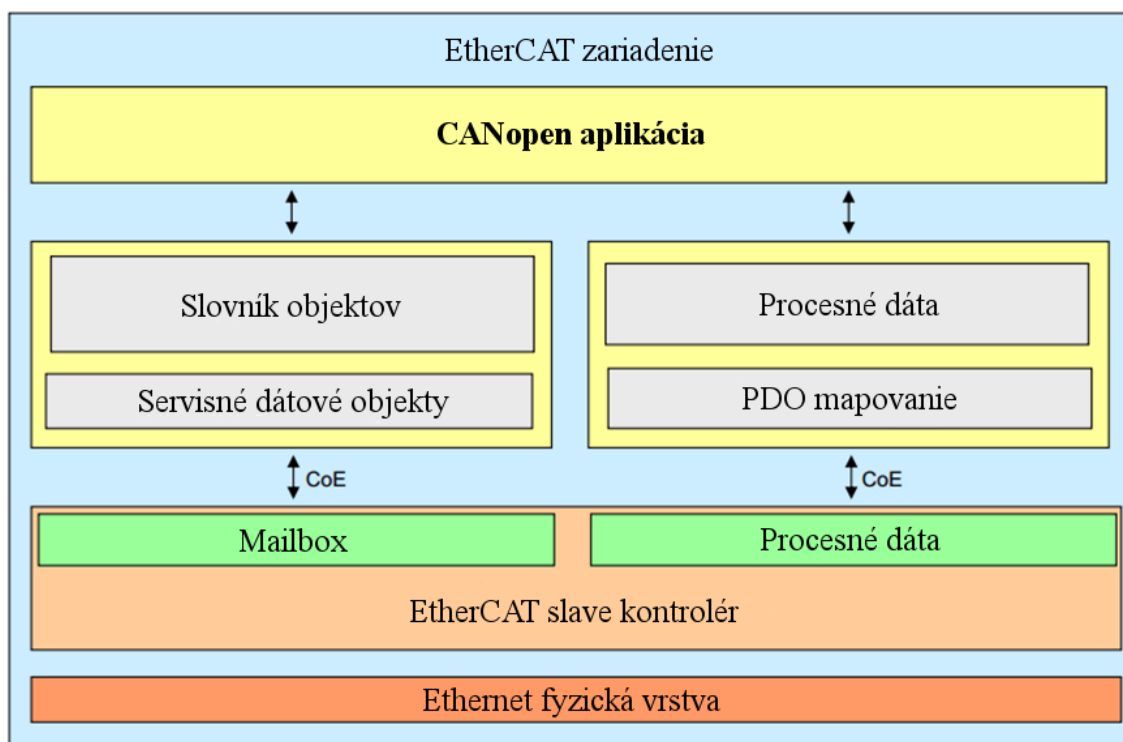
- Ethernet over EtherCAT (EoE) – Ethernetová komunikácia prostredníctvom EtherCATu.
- CANopen over EtherCAT (CoE) – integrácia paketov CANopen do protokolu EtherCAT. Prenáša servisné objekty (SDO) a procesné dáta (PDO) podľa CiA 301.
- File access over EtherCAT (FoE) – prenos súborov.
- Servo drive over EtherCAT (SoE) – integruje pakety protokolu SERCOS™ III.

### 3.2.2 CANopen over EtherCAT

Jedná sa o protokol štandardizovaný podľa CiA 301. Implementuje slovník objektov, prenos dát prostredníctvom servisných dátových objektov (SDO) a procesných dátových objektov (PDO). Samotné objekty sú štandardizované podľa CiA 402. Prenos SDO je sprostredkovaný pomocou mailboxu. Využívajú sa na čítanie a zapisovanie parametrov a konfigurácie. Každý PDO obsahuje minimálne 1 a maximálne 6 podobjektov zo slovníka, ktoré sú prenášané ako procesné dáta. Využívajú sa dva druhy PDO, a to pre zápis, nazývané RxPDO a pre čítanie TxPDO.



RxPDO sú posiellané po kanále číslo 2 SyncManageru a TxPDO po kanále 3. Posielané sú priamo PDO objekty a až následne v zariadení sú spracované jednotlivé objekty podľa ich namapovania do PDO, ktoré sa nachádza v dokumente „ESI.xml“ (EtherCAT Slave Information). Jedná sa o dokument dodávaný s daným zariadením, ktorý obsahuje slovník objektov podporovaných zariadením, konfiguráciu zariadenia, komunikácie a namapovanie objektov do PDO. Princíp spracovania dát pomocou protokolu CoE je možno vidieť na obr. 11. [7]



Obr. 11: Prenos dát pomocou protokolu CoE [7]



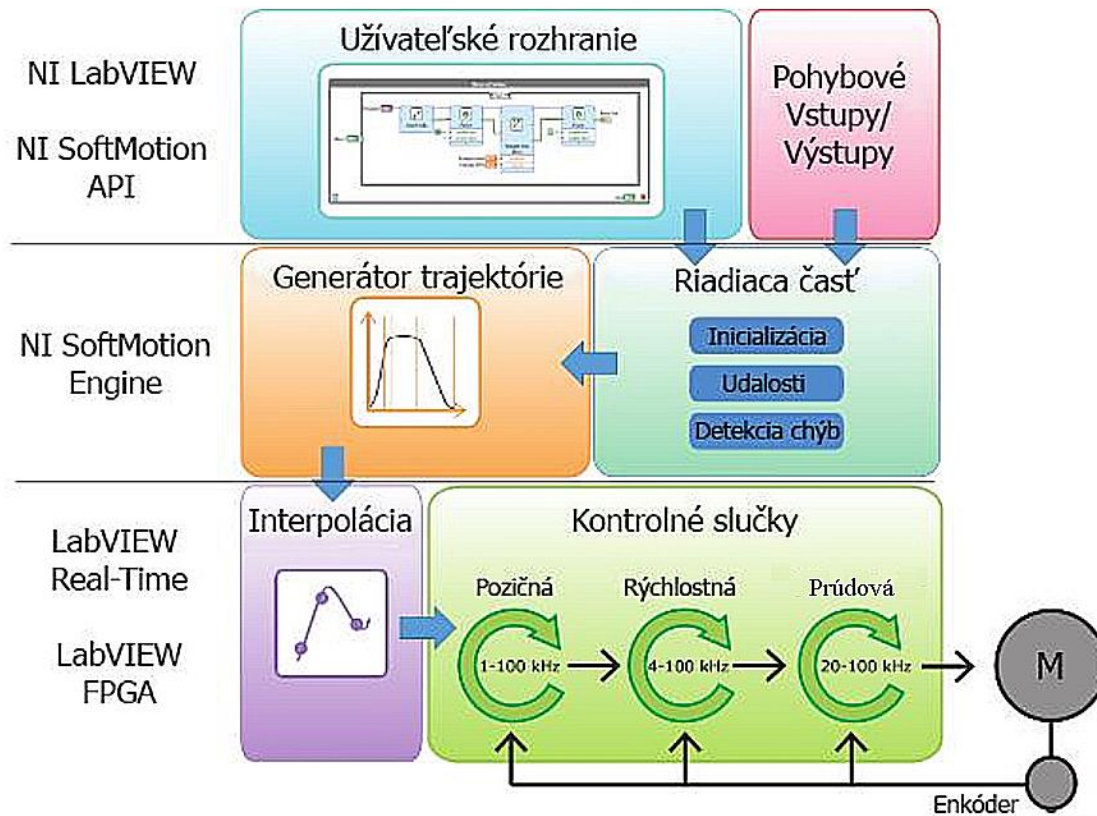
## 4 MODUL NI SOFTMOTION

NI SoftMotion je zásuvný modul pre grafické vývojové prostredie NI LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), ktorý umožňuje vytváranie pohybových aplikácií pomocou grafického programovacieho jazyka G od spoločnosti National Instruments. Pomocou tohto modulu je možná konfigurácia, ladenie, testovanie, riadenie ale aj simulácia pohybových systémov. [8]

Výhodou tohto modulu je jeho modularita, ktorú využíva na rozdelenie úloh, ktoré sú implementované na rôzne komponenty celého systému (obr. 12). Výsledkom je flexibilný riadiaci systém.

### 4.1 Komponenty NI SoftMotion

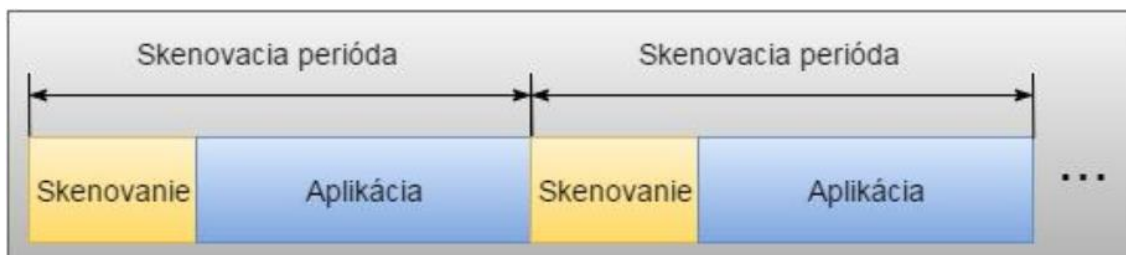
Užívateľské rozhranie môže byť sprostredkované cez bežný počítač alebo napríklad cez cRIO. Generátor trajektórie a riadiaca časť (NI SoftMotion Engine) je implementovaný v real-time kontroléri cRIO. Kontrolné slučky môžu byť znova súčasťou kontroléru cRIO alebo inej riadiacej jednotky pohonu. Celá komunikácia medzi systémovými komponentmi je sprostredkovaná pomocou otvorených štandardov, ako je napríklad EtherCAT. Táto modularita celého systému znižuje cenu, zvyšuje flexibilitu a predovšetkým spoľahlivosť. [9]



Obr. 12: Architektúra NI SoftMotion [9]

### 4.1.1 NI Scan Engine

NI Scan Engine je softvérový komponent LabVIEW Real-Time, ktorý môže byť súčasťou real-time zariadenia, ako je napríklad cRIO, alebo môže fungovať na platforme Windows. Umožňuje efektívny jednobodový prístup ku vstupom a výstupom. Pomocou skenovania ukladá dáta do globálnej pamätevej mapy a aktualizuje ich v každej skenovacej perióde (obr. 13). Dĺžka tejto periódy korešponduje s dobou trvania skenovania a dobou potrebnou pre vykonanie príslušnej logiky danej aplikácie. [10]



Obr. 13: Skenovacia perióda NI Scan Engine [10]

## 4.2 Zdroje pohybu (Motion Resources)

Základom použitia NI SoftMotion je vytvorenie zdroja pohybu a jeho priradenie reálnemu zariadeniu, poprípade jeho simulovanie. Je možné vytvoriť osi (axes), súradnice (coordinates) alebo tabuľky (tables). [8]

**Os** sa skladá z generátoru trajektórie, PID kontrolnej slučky alebo krokového výstupu. Osi môže byť priradený simulovaný alebo reálny hardvér a možné je riadenie servomotorov alebo krokových motorov. Po priradení je dostupná konfigurácia danej osi pomocou dialógového okna, kde je možné nakonfigurovať vstupy a výstupy, spätnú väzbu, trajektóriu, obmedzenia vzhľadom ku koncovým bodom a iné. [8]

**Súradnice** sú logické zoskupenie viacerých ôs do jedného súradnicového systému a výsledkom je jeden zdroj pohybu. Výhodou je, že všetky osi začínajú aj ukončujú pohyb synchronizovane. [8]

**Tabuľky** sa využívajú pre kontúrový a vačkový pohyb. Obsahujú pozičné body, podľa ktorých má byť daný pohyb vykonávaný. [8]

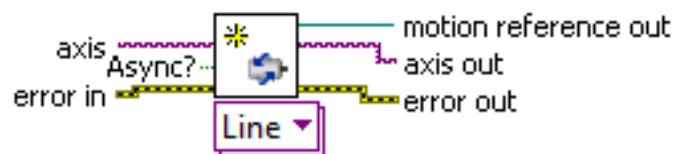
## 4.3 Referencie pohybu

Je možné vytvoriť tri druhy referencií. Prvá z nich sa viaže na pohybové rozhranie (Motion Interface), ktorá zahŕňa referenciu na os alebo súradnice. Druhou je položka zdroju pohybu (Motion Resource Item), ktorá pracuje s tabuľkou. Poslednou referenciou je pohybová dátová položka (Motion Data Item) slúžiaca na prácu s pohybovým profilom používaným pri generovaní offline trajektórií. [8]

Práca s referenciami pohybu obsahuje tri základné funkcie:

- Create Motion Reference
- Wait Until Done
- Destroy Motion Reference

**Create Motion Reference** slúži na vytvorenie referencie, s ktorou sa následne pracuje v ostatných funkciách potrebných pre prácu s pohybovým prostriedkom. Pomocou kontextového okna je umožnený výber atribútov. Napríklad pri vytvorení referencie na pohybové rozhranie je možné vybrať atribút Straight-Line Move (obr. 14), ktorý slúži pre prácu s osou vykonávajúcou lineárny pohyb. [8]



Obr. 14: Create Motion Reference (Straight-Line Move) [8]

**Wait Until Done** je funkcia (obr. 15) zabráňujúca práci s prostriedkom, pokiaľ nie je úspešne ukončená daná synchronná operácia. [8]

**Destroy Motion Reference** zabezpečuje zrušenie existujúcej referencie a uvoľnenie pamäte, ktoré je potrebné hlavne pri náročnejších aplikáciách. Používanie tejto funkcie (obr. 15) je odporúčané aj napriek tomu, že referencia by mala byť automaticky zrušená po ukončení aplikácie. [8]



Obr. 15: Wait Until Done (vľavo), Destroy Motion Reference (vpravo) [8]

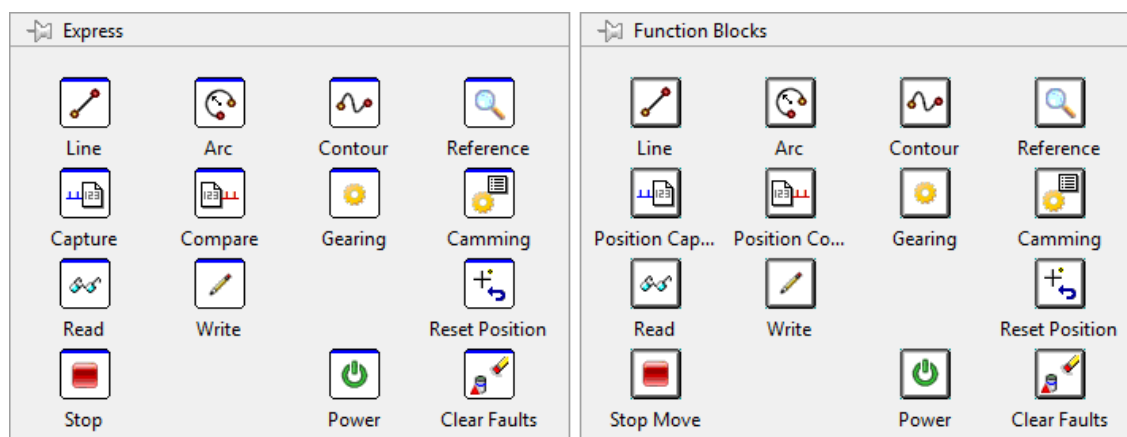
## 4.4 Express VI a funkčné bloky

Express VI (Virtual Instruments) a funkčné bloky (obr. 16) sú využívané k vytváraniu deterministických pohybových aplikácií. Na výber v oboch prípadoch máme vykonanie rôznych druhov pohybov, ako napríklad kontúra (Contour), referenčný pohyb (Reference) a ďalšie iné. K dispozícii sú tiež funkcie na zastavenie pohybu, čítanie dát, zapisovanie, vymazávanie chýb, aktivovanie osi a kontroléru a iné. [8]

**Express VI** je možné konvertovať na funkčný blok a na Sub VI. Je možné ho používať synchronne aj asynchrónne. Poskytuje možnosť konfigurácie v dialógovom okne, v ktorom je zobrazený profil polohy, rýchlosti ale aj zrýchlenia v grafe. [8]

**Funkčný blok (Function Block)** je na rozdiel od Express VI možné používať výhradne asynchrónne. Rovnako je poskytnutá možnosť konverzie na Sub VI, ale aj na

Express VI. V konečnom dôsledku je funkčný blok principiálne aj funkčne totožný s asynchrónnym Express VI. [8]



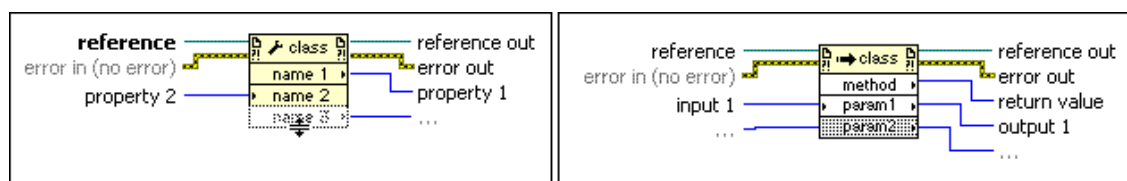
Obr. 16: Express VI a funkčné bloky

## 4.5 Metódy a vlastnosti

Metódy a vlastnosti (obr. 17) sú využívané pri nižšej úrovni programovania. Pripojením referencie je možné na nich vykonávať príslušnú operáciu, či už sa jedná o referencie VI, objektov, alebo pohybových zdrojov SoftMotion. [8]

**Vlastnosti (Property Node)** sú atribútmi danej referencie a po jej pripojení sa tento uzol automaticky upraví na danú triedu tejto referencie. Pomocou tohto uzlu je potom možné pristupovať k zvoleným atribútom, pričom voľba prístupu ku danej vlastnosti je individuálna, teda pre zápis aj čítanie. [8]

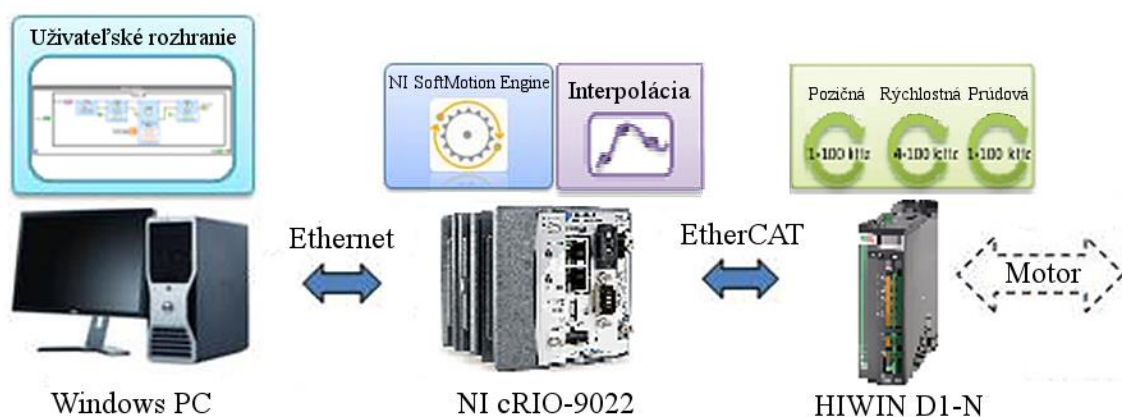
**Metódy (Invoke Node)** slúžia na vyvolanie akcie alebo metódy na príslušnej referencii, ktorá je privedená na vstup uzlu Invoke Node. [8]



Obr. 17: Property Node (vľavo), Invoke Node (vpravo) [8]

## 5 POUŽITÝ HARDVÉR

Práca sa zaoberá riadením lineárneho pohonu HIWIN pomocou frekvenčného meniča D1-N rovnako od firmy HIWIN na platforme CompactRIO od spoločnosti National Instruments. Lineárny motor je pripojený na frekvenčný menič silovým vedením, príslušnou kabelážou pre koncové spínače a enkóder. Následné spojenie je realizované medzi frekvenčným meničom, ktorý zastáva funkciu slave zariadenia a real-time kontrolérom cRIO-9022 vo funkcii master zariadenia pomocou zbernice EtherCAT. Koncovým prvkom je PC, pričom komunikácia medzi cRIO a PC je zabezpečená pomocou Ethernetu. Celú hierarchiu zapojenia a funkcie daných komponentov celého riadiaceho systému je možné vidieť na obr. 18.



Obr. 18: Architektúra riadiaceho systému pohonu

### 5.1 Lineárna os HIWIN LMU160

Modelové číslo osi vyjadruje zároveň aj jej technické vybavenie. Modul LMU16 s pracovným zdvihom 610 mm je vybavený jedným lineárnym motorom LMS13 a integrovaným dvojitém guľičkovým vedením rady HG15. Spätnú väzbu poskytuje magnetický inkrementálny enkóder s 2 koncovými a 1 referenčným spínačom. Pre vedenie kabeláže modul používa energetickú reťaz typu B15.050.

#### 5.1.1 Lineárny motor LMS13

Použitý lineárny motor je z modelovej rady LMS. Jedná sa o trojfázové synchronné motory s permanentnými magnetmi s plochou geometriou a krátkym statorom. Konkrétnym použitým typom je motor LMS13. Motor je chladený okolitým vzduchom a je vybavený pneumatickou brzdou. Teplota motora je snímaná tromi termistormi typu PTC SNM 120 v sérii s kladným teplotným súčiniteľom. Princíp, stavba a ďalšie vlastnosti sú popísané v kapitolách 2.2 a 2.3. Niektoré technické parametre motora sú uvedené v tab. 1.



Menovitá sila (pri teplote 120 °C)	$F_c$	203 N
Menovitý prúd (pri teplote 120 °C)	$I_c$	4,6 A(rms)
Špičková sila (po dobu 1 s)	$F_p$	406 N
Špičkový prúd (po dobu 1 s)	$I_p$	13,8 A(rms)
Silová konštanta	$K_f$	44 (rms)
Príťažlivá sila	$F_a$	805 N
Maximálna teplota vinutia	$T_{max}$	120 °C
Elektrická časová konštanta	$K_e$	10,4 ms
Odpor vinutia (pri teplote 25 °C)	$R_{25}$	3,1 $\Omega$
Odpor vinutia (pri teplote 120 °C)	$R_{120}$	4,1 $\Omega$
Indukčnosť vinutia	$L$	32,2 mH
Rozteč pólových dvojíc	$2\pi$	32 mm
Spätná elektromotorická sila	$K_v$	26 Vrms (m/s)
Motorová konštanta	$K_m$	20,4 N/ $\sqrt{W}$
Tepelný odpor	$R_{th}$	0,7 °C/W
Tepelná časová konštanta	$T_{th}$	4350 s
Maximálna rýchlosť	$V_{max}$	4 m/s
Maximálne zrýchlenie	$A_{max}$	50 m/s <sup>2</sup>

Tab. 1: Technické parametre motora HIWIN LMS13 [11]

### 5.1.2 Odmeriavanie

Jedná sa o lineárne inkrementálne magnetické odmeriavanie MAGIC od spoločnosti HIWIN (obr. 19). Odmeriavací systém použitý v osi sa skladá z magnetickej pásky a čítacej hlavy. Magnetická páska je zložená z lepiacej pásky, samotnej magnetickej pásky a na povrchu sa nachádza krycia páska z ušľachtilej ocele. Umiestnená je na nosníku mimo koľajnice lineárneho vedenia. Vybrané vlastnosti magnetickej pásky je možno vidieť v tab. 2 a čítacej hlavy v tab. 3.

Šírka	10,0 ± 0,2 mm	Presnosť	± 20 $\mu\text{m/m}$
Hrúbka	2,00 ± 0,05 mm	Periódá	1 mm
Rozteč pólov	1 mm	Pracovná teplota	0 °C až 50 °C
Magnetická remenancia	> 240 mT	Koeficient tepelnej rozťažnosti	11,5 x 10 <sup>-6</sup> mK <sup>-1</sup>

Tab. 2: Vlastnosti magnetickej pásky HIWIN [1]

Čítacia hlava je pripevnená na jazdci motora. Hlava obsahuje štyri hallove sondy radené za sebou, pričom prvá a tretia zaznamenávajú kladný a záporný sínusový signál. Druhá a štvrtá snímajú kladný a záporný sínusový signál s fázovým posunom 90°. Elektronikou v senzore je vždy jeden z páru invertovaný. Následne sú tieto dva signály



superponované a výstupom zo senzoru sú dva sínusové signály, pričom jeden z nich je s fázovým posunom  $90^\circ$  a tretím je obdĺžnikový referenčný signál.

Typ	1 V <sub>pp</sub> Analógový	Referenčný signál	1 mm/pulz
Výstupný signál	sin/cos, 1 V <sub>pp</sub>	Periódna signálu	1 mm
Rozlíšenie	Podľa A/D prevodníku	Pracovné napätie	5 V $\pm$ 5%
Obojsmerná opakovateľnosť	5 $\mu$ m	Maximálna meriaca rýchlosť	10 m/s
Pracovná teplota	0 °C až 50 °C		

Tab. 3: Vlastnosti čítacej hlavy HIWIN [1]

Na základe parametrov frekvenčného meniča a faktom, že používa štvornásobné dekódovanie signálu, je výsledné rozlíšenie 1  $\mu$ m.



Obr. 19: Odmeriavanie HIWIN MAGIC [1]

### 5.1.3 Koncové spínače

Konkrétnym typom osadeným na osi je indukčný snímač IH020BK41VD od firmy Wenglor (obr. 20) a niektoré jeho vlastnosti sú uvedené v tab. 1. Na osi sú umiestnené tri snímače tohto typu. Dva z nich slúžia na zaznamenávanie koncových polôh osi a posledný má referenčnú funkciu.



Obr. 20: Indukčný snímač Wenglor [12]

Spínacia vzdialenosť	2 mm	Korekčný faktor V2A/CuZn/Al	0,73/0,49/0,39
Spínacia frekvencia	1500 Hz	Napájacie napätie	10 V až 30 V DC
Spínacia hysterézia	< 15 %	Pracovná teplota	-25 °C až 80 °C

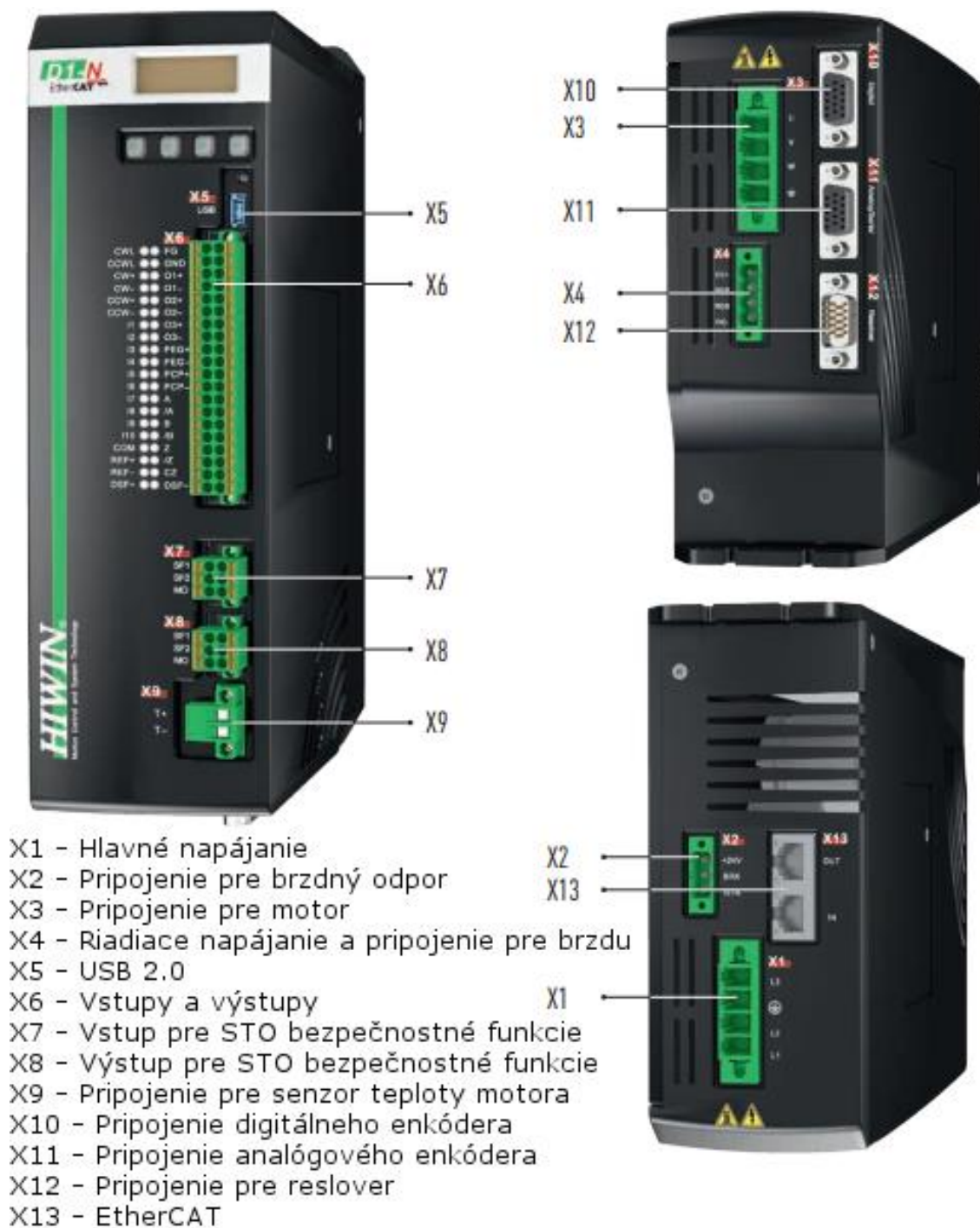
Tab. 4: Vlastnosti indukčného spínača Wenglor [12]

## 5.2 Frekvenčný menič HIWIN D1-N

Firma HIWIN poskytuje 4 dostupné modely frekvenčného meniča D1-N. Hlavným rozdielom je výstupný prúd, ktorý daný menič dokáže poskytnúť pre riadenie motora. Dostupné varianty poskytujú špičkový prúd (amplitúdová hodnota) 9, 18, 36 a 90 A. Použitá verzia meniča je v prevedení 18 A. Jeho vybrané vlastnosti sú uvedené v tab. 4 a prehľad konektorov je zobrazený na obr. 21.

Napájacie napätie	Napätie	220 až 240 VAC $\pm$ 10%
	Frekvencia	50 až 60 Hz $\pm$ 5%
	Počet fáz	1 alebo 3
	Riadiace napätie	24 VDC $\pm$ 10%
	Max. riadiaci prúd	1,5 A
Výstupný prúd	Trvalý prúd (efektívny)	4,2 A
	Špičkový prúd (efektívny)	12,7 A
	Max. trvanie špičkového prúdu	1 s
Typ riadenia		vektorové
Spínacia frekvencia PWM		16 kHz
Rozhranie enkódera	Napájacie napätie	+5 VDC $\pm$ 5%, 500 mA
	Analógový enkóder	Sin/Cos 1V <sub>pp</sub> (frekv. < 1MHz)
	Digitálny enkóder	TTL, (frekv. < 5MHz)
	EnDat 2.2	Štandardný
	Hallove senzory	Digitálne (A, B, C), 120° offset
EtherCAT	Funkcie	CoE PDO komunikácia CoE SDO komunikácia Distribúované hodiny
	Módy podľa CiA402	Profile Position Mode (1) Profile Velocity Mode (2) Cyclic Synchr. Position Mode (8) Cyclic Synchr. Velocity Mode (9) Homing Mode (6)
Parametrizovateľné vstupy/výstupy	10 digitálnych vstupov	Ľubovoľne zvoliteľné
	3 digitálne výstupy	Ľubovoľne zvoliteľné
	Riadenie brzdy	24 VDC, max. 1 A
Programovateľné rozhranie		USB 2.0
Operačná teplota		0 až 50 °C

Tab. 5: Vlastnosti frekvenčného meniču HIWIN D1-N [13]



Obr. 21: Prehľad pripojení HIWIN D1-N [13]

### 5.3 NI CompactRIO-9022

Kontrolér (obr. 22) je vybavený real-time procesorom MPC8347 od spoločnosti Freescale s frekvenciou 533 MHz, 256 MB operačnou pamäťou DRAM a interným úložiskom o veľkosti 2 GB a disponuje real-time operačným systémom VxWorks.

Rozšírenie pamäti je umožnené pomocou USB portu, pripojením pamäti flash alebo pevným diskom. Pre pripojenie periférií je kontrolér vybavený sériovým portom

RS232 a pre sériovú komunikáciu sú dostupné 2 prítomné porty pre Ethernet. Prvý podporujúci 10BaseT, 100BaseTX a 1000BaseTX Ethernet, slúžiaci pre sieťovú komunikáciu a druhý port stavaný pre 10BaseT, 100BaseTX Ethernet, ktorý podporuje využitie protokolu EtherCAT.



Obr. 22: NI cRIO-9022 [14]

## 6 KONFIGURÁCIA POHONU A NASTAVENIE REGULÁCIE

Najdôležitejším faktorom pre korektnú činnosť pohonu je správna konfigurácia a nastavenie regulácie. Chybné nastavenie a naladenie regulácie vedie k rôznym problémom, ako sú napríklad kolísanie rýchlosti, nepresnosť, trhané pohyby ba až neschopnosť rozjazdu, alebo akéhokoľvek pohybu sprevádzané neštandardnými zvukmi.

Pre konfiguráciu a nastavenie regulácie pohonu bol použitý softvér Lightning od firmy HIWIN, ktorý je kompatibilný pre použitie s frekvenčným meničom D1-N a ponúka veľa výhod pre parametrizáciu.

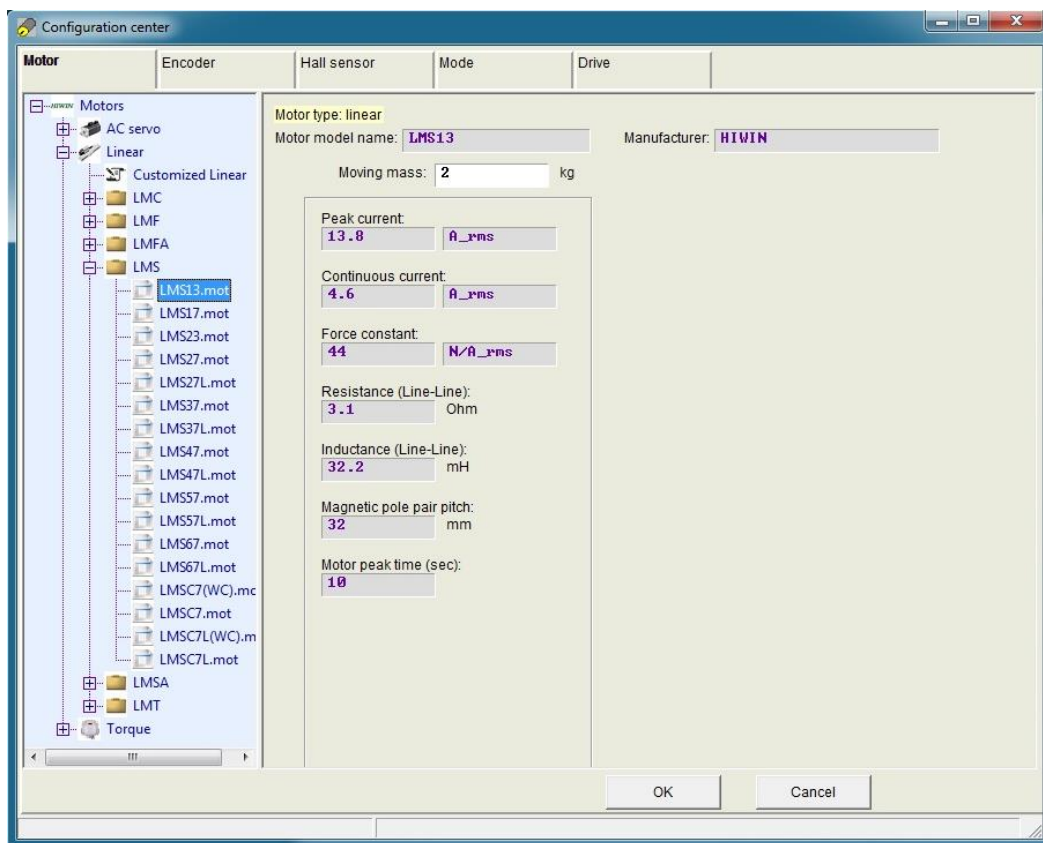
### 6.1 Konfigurácia

Pre konfiguráciu je použitá funkcia „Configuration center“. Konfigurácia prebieha v piatich krokoch:

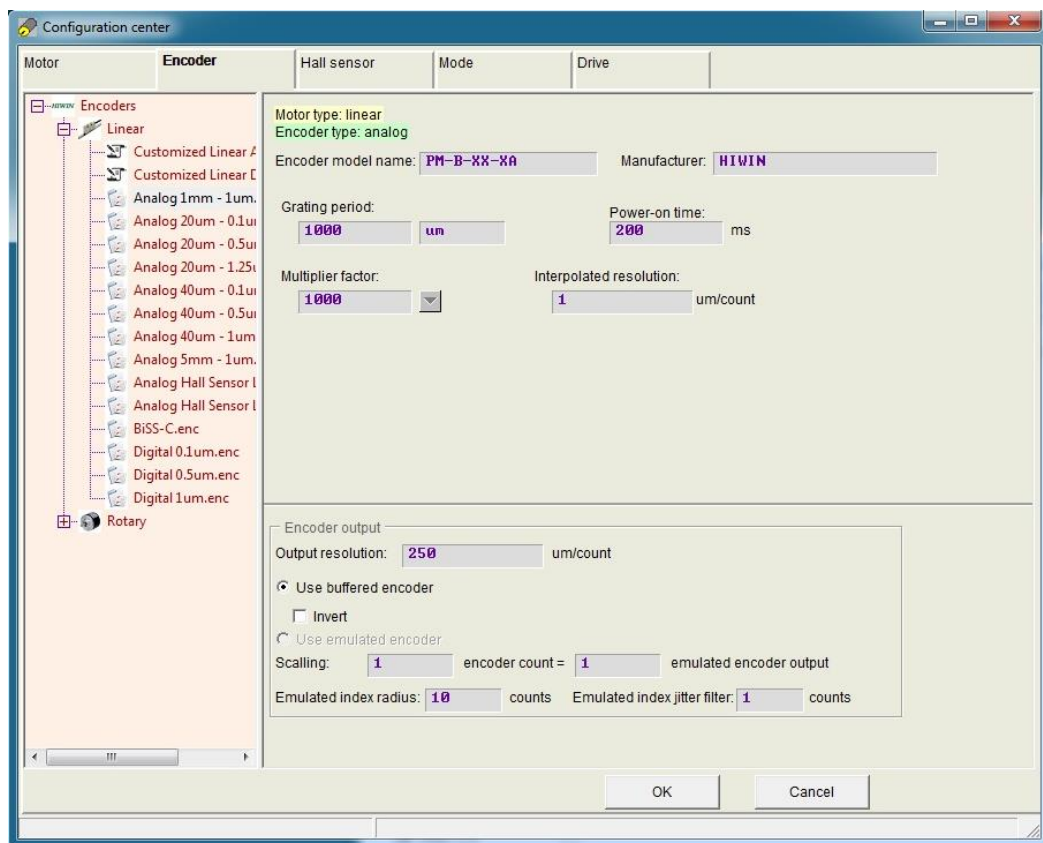
- 1) Nastavenie parametrov motora
- 2) Nastavenie parametrov enkódera
- 3) Selekcia halového senzora
- 4) Selekcia operačného módu
- 5) Voľba napájania meniča

Jednou zo spomínaných výhod daného softvéru spočíva práve pri nastavení parametrov motora a enkódera a to práve preto, že je možné vybrať z motorov a enkóderov poskytovaných firmou HIWIN, pre ktoré sú už dané parametre nastavené (obr. 23 a 24). Jediným potrebným parametrom pre doplnenie je hmotnosť, ktorou bude motor zaťažovaný. V prípade použitia motorov a enkóderov od iných výrobcov je nutné nastaviť všetky parametre (napr. indukčnosť a odpor cievok, rozstup pólpárov, menovitý prúd, rozlíšenie enkódera a iné.) manuálne z materiálov poskytnutých daným výrobcom.

Nasleduje výber halového senzora, a keďže motor ním nie je vybavený, je vybratá práve táto možnosť, teda neprítomnosť tohto senzora. Ďalšími možnosťami je použitie digitálneho alebo analógového halového senzora. Nasledujúcim krokom je voľba operačného módu, ale pri použití meniča, ktorý využíva zbernicu EtherCAT a protokol CoE, nie je umožnená v tomto kroku žiadna akcia. Posledným krokom je výber napájania meniča, kde v tomto prípade bol menič napájaný 24 V. Konfigurácia je ukončená zápisom daných parametrov z pamäte RAM do pamäte flash frekvenčného meniča.



Obr. 23: Nastavenie parametrov motora

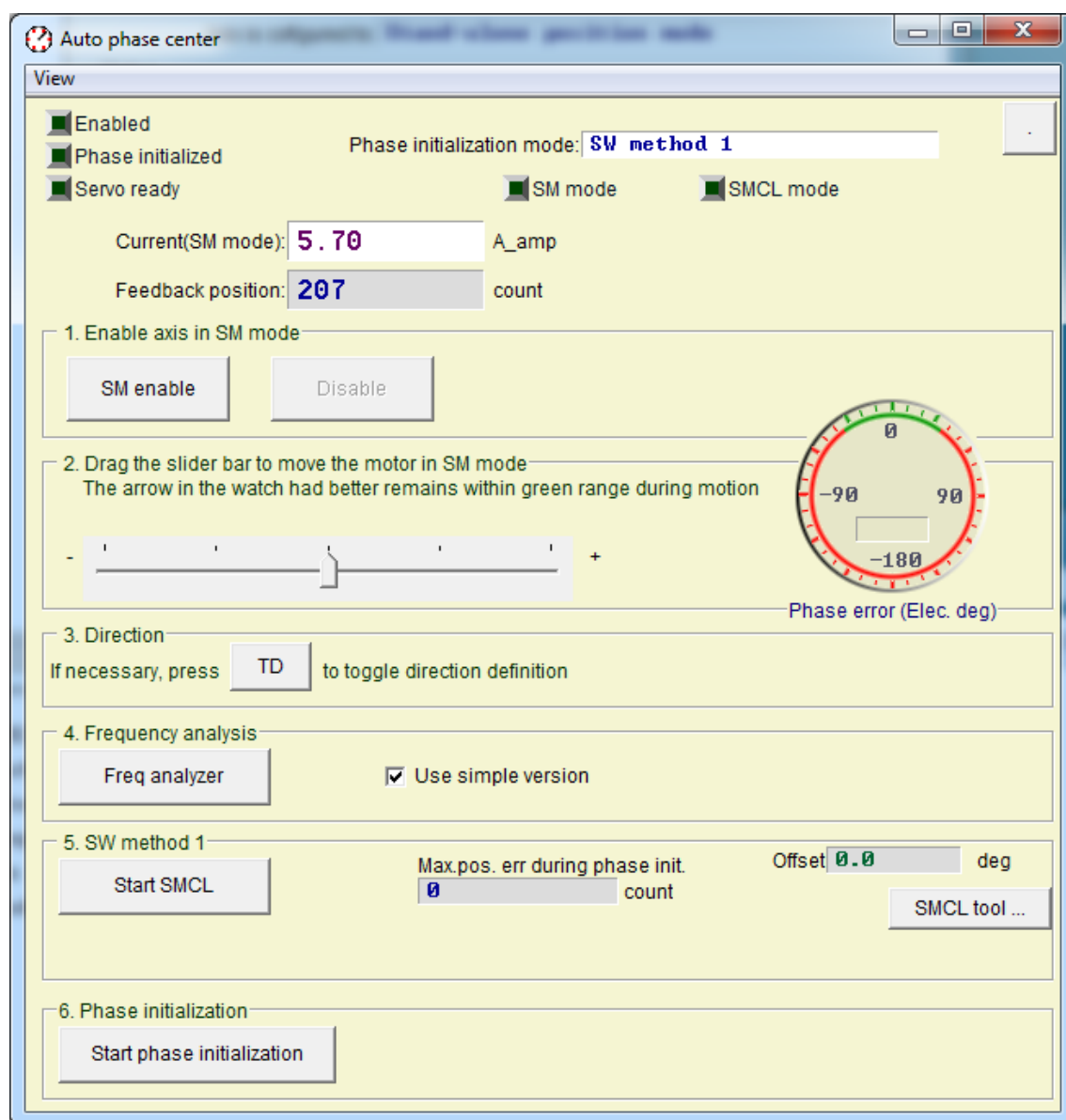


Obr. 24: Nastavenie parametrov enkódera



## 6.2 Základné nastavenie regulácie

Lightening ponúka funkciu, ktorou je možné vykonať základné nastavenie osi. Používa sa len pri prvom zavedení motora do prevádzky. Funkcia sa nazýva „Auto phase center“ (obr. 25). Nastavenie znova prebieha vo viacerých krokoch. Inicializačný fázový mód je automaticky nastavený na „SW method 1“, ktorý je v prípade tejto osi na výber jediný. Jedná sa o metódu, ktorá má za úlohu nájsť správnej komutácie motora. Toto nastavenie prebieha v móde „SM“ (Stepper Mode), čo znamená, že motor je riadený otvorenou riadiacou slučkou s neustálym záznamom riadiaceho prúdu. Hodnota prúdu v tomto móde je automaticky nastavená na 95 % hodnoty permanentného prúdu motora (jeho špičková hodnota, nie efektívna).



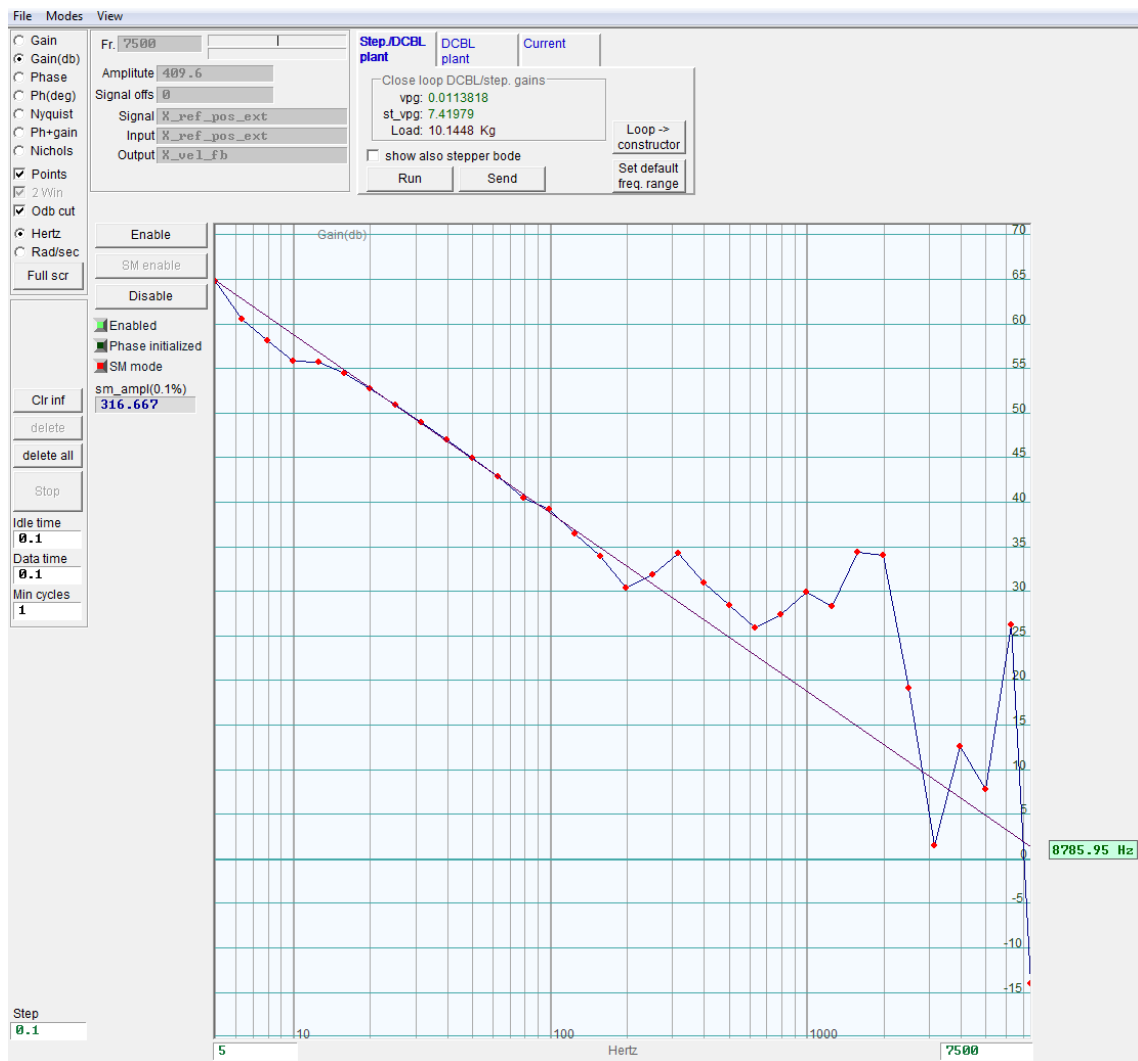
Obr. 25: „Auto phase center“

Prvým krokom je aktivácia SM módu, čo má za následok aktiváciu kontroléru a nabudenie motora. Následne je potrebné pohybovať s posúvačom do oboch strán a sledovať „Phase error“ displej, ktorý zobrazuje fázovú chybu pri buzení motora. V prípade, že by sa motor pohyboval opačným smerom ako je žiadaný, je možné použiť tlačidlo „TD“ (Toggle direction) pre softvérové obrátenie smeru pohybu bez nutnosti úpravy kabeláže. Ručička na displeji sa musí nachádzať po celý čas pohybu v oboch smeroch v zelenej zóne ciferníku. Prípad, že by sa ručička ocitla mimo zelenú zónu, môžu mať za následok nasledujúce dôvody:

- Obzvlášť nepriaznivá počiatočná poloha pri štarte. Za určitých okolností sa môže motor zadrieť na mieste. Príčinou býva prevažne to, že motor nebol počas dlhej doby uvedený do pohybu.
- Príliš nízka hodnota prúdu pre SM mód. Je možné, že motor potrebuje vyšší prúd, aby sa pohyboval správne kvôli treniu alebo vyššej záťaži. Príčinou môže byť nesprávne nastavenie parametru maximálneho prúdu pre motor.
- Nesprávne nastavenie parametrov motora alebo enkódera v „Configuration center“.

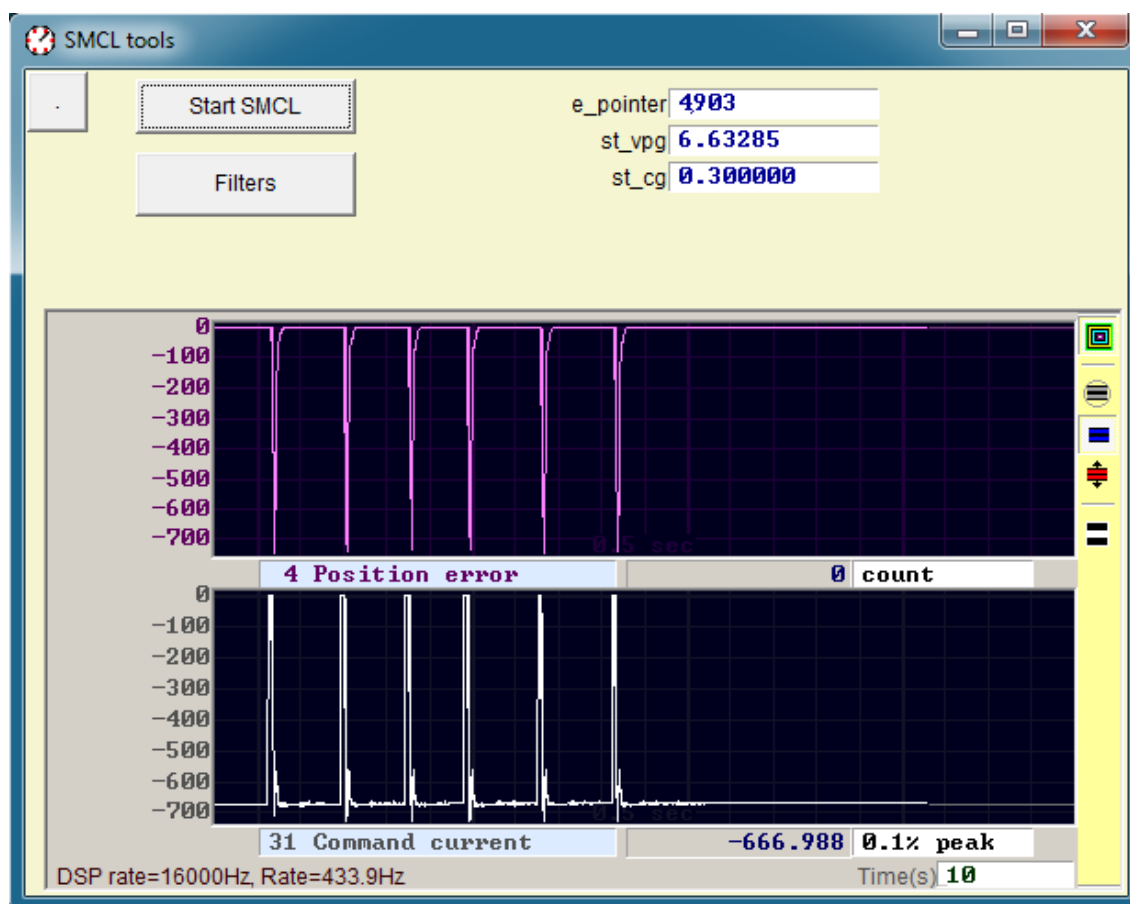
Ďalej je nutné vykonať frekvenčnú analýzu pre nastavenie parametrov uzavretej riadiacej slučky. Jednou z ďalších výhod tohto softvéru je, že dokáže aktivovať motor v celom spektre frekvencií riadiacej sekcie a merať jej zosilnenie potrebné pre riadenie. Na základe tohto merania dokáže spraviť frekvenčnú analýzu a vypočítať potrebné parametre. Táto analýza a nastavenie parametrov je vykonané po stlačení tlačidla „Freq analyzer“ pri označení možnosti „Use simple version“. Pri nezakliknutí tejto možnosti je táto metóda poloautomatická s využitím charakteristiky frekvenčnej odozvy. Pre použitie poloautomatickej metódy je potrebné znova stlačiť tlačidlo „Freq analyzer“, pričom je následne automaticky otvorené dialógové okno „Freq analyzer junior“. Nastavenie prebieha v okne „Step./dcbl plant“, ktoré slúži pre konfiguráciu základných riadiacich parametrov. Proces sa spúšťa tlačidlom „Run“. Po ukončení procesu je možné vidieť výslednú amplitúdovú charakteristiku v závislosti na vstupnej frekvencii. Pre určenie správnych parametrov je potrebné vložiť priamku so sklonom -20 Db/dec. Dôvodom tohto sklonu je nastavenie parametrov filtra pre dolný priepust, ktorý tlmí a postupne vyruší všetko pre vyššie frekvencie. Touto priamkou je potrebné preložiť padajúcu časť krivky amplitúdovej charakteristiky (obr. 26). Následne sú dopočítané dané regulačné parametre uzavretej riadiacej slučky softvérom Lightning. Poslednou fázou tohto kroku je zápis daných parametrov do pamäte flash pomocou tlačidla „Send“.





Obr. 26: Amplitúdová charakteristika

Ďalším krokom je inicializácia fázy. Pre spustenie je potrebné stlačiť tlačidlo „Start phase initialization“. Po správnej inicializácii sa rozsvieti dióda „Phase Initialized“ v ľavom hornom rohu. V prípade, že by motor nebol schopný správnej komutácie, je k dispozícii funkcia „SMCL“ (obr. 27). Jej zmysel je minimalizovať pozičnú chybu pri inicializačnej komutácii a minimalizovať pohyb motora. Kliknutím na tlačidlo „SMCL tool“ sa objaví dialógové okno pre nastavenie inicializačných parametrov. Správnu komutáciu je možné zaistiť úpravou hodnoty „st\_cg“ (start common gain), vyjadrujúcej proporcionálne zosilnenie pri inicializačnej komutácii. Po každej zmene tejto hodnoty je potrebné stlačiť tlačidlo „Start SMCL“. Úprava sa vykonáva, pokiaľ nie je pozičná chyba zredukovaná na minimum alebo sa neobjaví oscilácia pozičnej chyby. Zároveň by sa hodnota „e\_pointer“ (error pointer), ktorá je ukazovateľom chyby, mala meniť konštantne a nie skokovo. Pri dosiahnutí oscilácie je nutné túto hodnotu mierne zmenšiť. Týmto krokom je základné nastavenie regulácie ukončené a môže sa pokračovať v odlaďovaní ďalších parametrov.



Obr. 27: „SMCL tool“

Po správnom nastavení bola výsledná hodnota „st\_cg“ rovná 0,8 a pozičná chyba sa zredukovala z -700  $\mu\text{m}$  na hodnotu -120  $\mu\text{m}$ .

### 6.3 Ladenie kontroléra

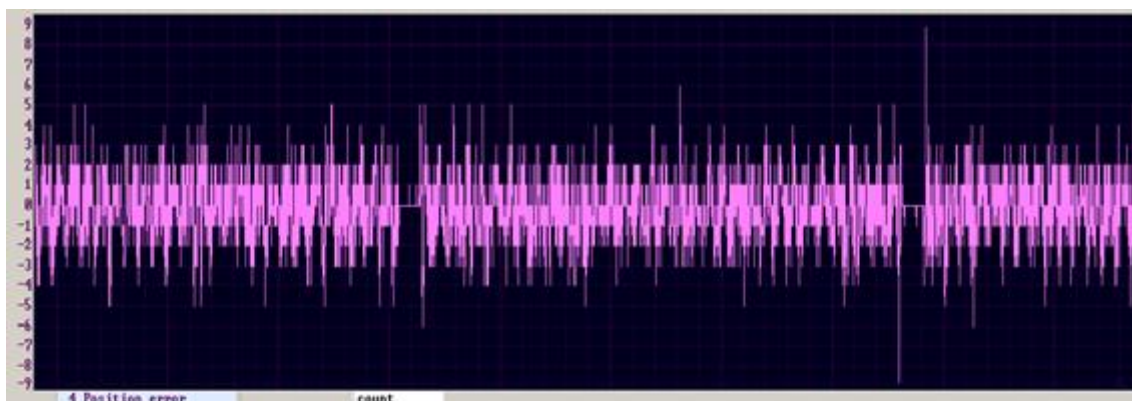
Ladenie prebieha pomocou funkcie „Performance center“ za stáleho pohybu medzi dvoma bodmi a upravovaním hodnoty „Common Gain“ (proporcionálne zosilnenie). V tomto prípade je účelom minimalizovanie pozičnej chyby. V okne „Performance center“ sú nastavené parametre rýchlosti, zrýchlenia a spomalenia, pre ktoré chceme os odladiť. Zvolením módu „P2P“ (Point to Point), zakliknutím možnosti „Repeat“ a nastavením bodov „P1“ a „P2“ na osi, medzi ktorými sa má motor pohybovať, je nastavený cyklický pohyb medzi dvoma bodmi. Aktivácia osi sa vykoná pomocou tlačidla „Enable“. Pre spustenie pohybu je potrebné stlačiť jedno z tlačidiel „GO P1“ alebo „GO P2“. Stlačením tlačidla „Set scope“ je otvorený režim pre zber dát, kde sú prednastavené 4 kanály pre zber určitých hodnôt, ktoré je možno ľubovoľne meniť. Zmenou hodnoty „Common Gain“ je potrebné docieľiť, čo najmenšiu pozičnú chybu pre správny a stabilný chod osi.

Grafy 1, 2 a 3, ktoré sú uvedené nižšie vyjadrujú závislosť pozičnej chyby (os y) na čase (os x). Škálovanie zvislej osi y na grafoch je rozdielne, a to z dôvodu

automatickej úpravy škálovania osí softvéru Lightning. Nasledujúce grafy na obr. 28 a 29 vyjadrujú vplyv hodnoty „Common Gain“ na pozičnú chybu. Prvý graf znázorňuje stav pred ladením pri východzej hodnote 0,3 a druhý graf stav po ladení, kde nájdená optimálna hodnota je 0,75. Ladenie prebiehalo pri pohybových parametroch: rýchlosť  $50000 \mu\text{ms}^{-1}$ , zrýchlenie a spomalenie  $2000000 \mu\text{ms}^{-1}$ .



Obr. 28: Graf 1 (Common Gain = 0,3)



Obr. 29: Graf 2 (Common Gain = 0,75)

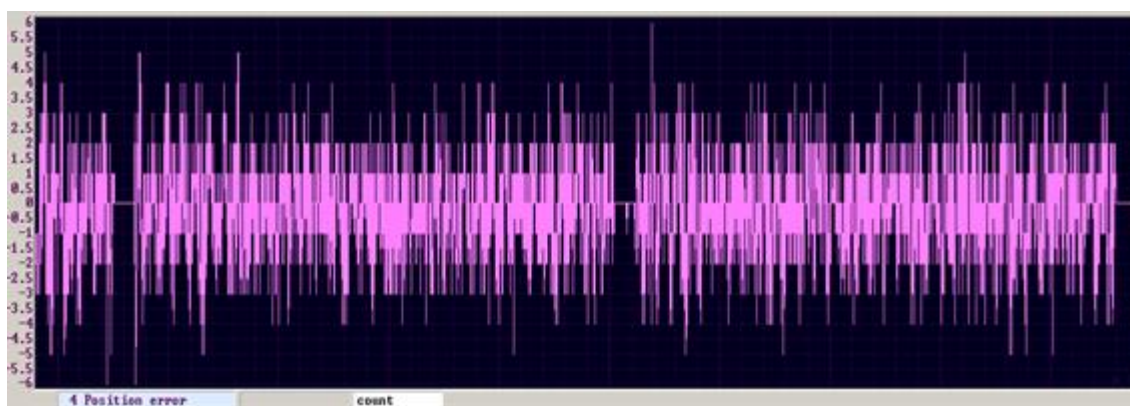
Optimálnou hodnotou bola pozičná chyba zminimalizovaná z  $\pm 60 \mu\text{m}$  na hodnotu  $\pm 9 \mu\text{m}$ .

## 6.4 Dodatočné ladenie

Softvér Lightning ponúka funkciu „Advanced gains“, ktorá umožňuje ďalej optimalizovať riadiace parametre. Je možné pridávať filtre typu dolný priepust a pásmová zadrž pre prúdovú slučku, pričom môžu byť nastavené manuálne alebo alternatívou je ich automatická generácia. Ďalšou možnosťou je opätovná úprava parametrov pre prúdovú ale aj rýchlostnú slučku. Lightning ponúka aj funkcie ako „VSF“ (vibration suppression function), „Friction Compensation“ a „Acc feedforward“. Funkcia „VSF“ sa používa pre filtrovanie nízkofrekvenčných oscilácií. V tomto prípade nebolo nutné túto funkciu použiť. „Friction Compensation“ slúži na kompenzáciu

trenia. Optimálna hodnota je daná priemernou hodnotou prúdu pri pohybe z jedného bodu a späť za žiadanej rýchlosti. Priemernú hodnotu prúdu možno získať pomocou funkcie „Scope“. Výsledkom je zníženie pozičnej chyby pri rozbehu motora.

Poslednou funkciou je „Acc feedforward“. Jedná sa o akceleračnú doprednú väzbu, ktorá slúži pre redukciu coggingu, ktorý je vidieť na grafe pozičnej chyby, a to práve jej kolísaním. Pre správne nastavenie tejto hodnoty je nutné ju najskôr vynulovať. Opäť je potrebné pomocou funkcie „Scope“ zaznamenávať hodnoty, v tomto prípade hodnoty prúdu a referenčného zrýchlenia. Toto meranie by malo prebiehať pri nastavení zrýchlenia na maximálnu hodnotu. Výsledná hodnota „Acc feedforward gain“ je podielom maximálneho prúdu, ktorým bol motor budený a maximálneho referenčného zrýchlenia. Hodnotou  $2,12 \cdot 10^{-5}$  sa podarilo pozičnú chybu zmenšiť z  $\pm 9 \mu\text{m}$  na  $\pm 6 \mu\text{m}$  ako je to možno vidieť na grafe na obr. 30.



Obr. 30: Graf 3 (Acc feedforward gain =  $2,12 \cdot 10^{-5}$ )

## 7 REALIZÁCIA RIADENIA POHONU

Pred samotnou programovou časťou riadenia je najskôr nutné správne nakonfigurovať kontrolér cRIO. Pre konfiguráciu je ho potrebné pripojiť pomocou Ethernetu portu 1 priamo k PC alebo do rovnakej siete. Konfigurácia sa následne vykoná pomocou softvéru NI MAX, ktorá spočíva v nastavení IP adresy, pomenovaní zariadenia a inštaláciou potrebného softvéru na riadenie a komunikáciu. Po správnom nakonfigurovaní zariadenia je potrebné prepojiť kontrolér a frekvenčný menič Ethernet portom dva, na ktorom bude prevádzkovaný protokol EtherCAT.

### 7.1 Konfigurácia projektu LabVIEW

Po pripojení všetkých zariadení je prvým krokom pridanie kontroléru cRIO do projektu LabVIEW. Pridanie sa vykoná v kontextovej ponuke projektu „New > Targets and Devices“, kde je následne vybraný daný kontrolér. Po pridaní kontroléru sa v jeho kontextovej ponuke pridá master zariadenie opäť rovnakým spôsobom „New > Targets and Devices“, ktoré bude zastupovať on sám.

Pred pridaním riadiacej jednotky je nutné importovať konfiguračný ESI súbor vo formáte xml. Daný súbor obsahuje slovník objektov, základné konfiguračné parametre slave zariadenia, konfiguráciu komunikácie a PDO mapovanie. Pridanie tohto súboru sa vykoná v kontextovej ponuke master zariadenia a to zvolením Utilities > Import Device Profiles, kde sa vyberie daný súbor a importuje sa do projektu LabVIEW v PC aj do kontroléru cRIO.

Po týchto krokoch je možné pridať riadiacu jednotku, teda frekvenčný menič, ktorý plní funkciu slave zariadenia. Pridanie sa vykoná opäť v kontextovom okne master zariadenia, kliknutím na položku New > Targets and Devices a zvolením daného frekvenčného meniča.

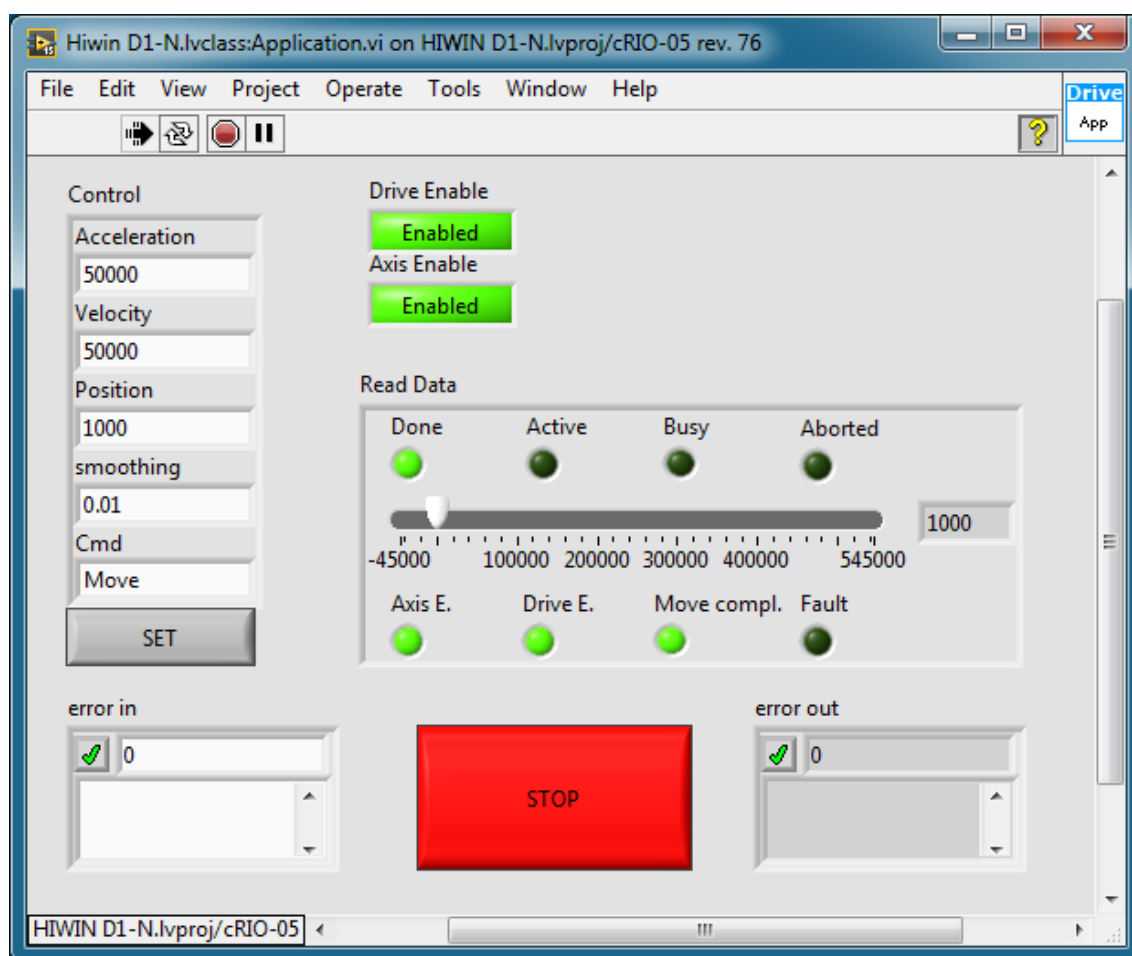
Posledným krokom je pridanie SoftMotion osi pomocou kontextového okna kontroléru opäť kliknutím na položku New > SoftMotion Axis. Následne sa tlačidlom „Change Binding“ vyberie riadiaca jednotka HIWIN.

### 7.2 Programová časť riadenia pohonu

Problémová časť riadenia spočíva v tom, že modul SoftMotion podporuje len riadiace jednotky AKD. Je to z dôvodu, že používa na riadenie príkazy vysokej úrovne a nie vždy sú kompatibilné s inými riadiacimi jednotkami. Riešením chýbajúcej podpory hardvéru tretej strany je použitie plug-inu SDI (SoftMotion Drive Interface). Tento plug-in slúži na úpravu rozhrania medzi SoftMotion aplikáciou a riadiacou jednotkou tretej strany. Jedná sa najmä o úpravu registrov využívaných v EtherCAT komunikácii pre odosielanie a prijímanie SDO a PDO. Plugin teda zabezpečuje preklad vysokoúrovňových funkcií SoftMotion aplikácie na požadovanú nízkoúrovňovú

komunikáciu s riadiacou jednotkou. Prvým krokom bolo teda vytvorenie vlastného SDI plug-inu použitím šablóny projektu, ktorý je v LabVIEW dostupný. Ďalším krokom bola úprava registrov, ktoré nekorešpondovali so skutočnými registrami riadiacej jednotky v niektorých VI (Virtual Instrument) tohto plug-inu.

V projekte boli využité už predpripravené objekty a knižnice pre prácu s funkciou „Scan Engine“ a komunikáciou EtherCAT. Ďalším použitým objektom bol „SDI – HIWIN“, teda vyššie uvedený plug-in. Samotná aplikácia „Application.vi“, ktorá bola použitá pre riadenie pohonu bola rovnako zjednotená do objektu s ostatnými „vi“, ktoré zabezpečovali rôzne funkcie tejto aplikácie. Užívateľské rozhranie aplikácie (obr. 31) zobrazuje aktuálnu polohu, stav pohybu a stav riadiacej jednotky. Rozhranie poskytuje užívateľovi ovládať pohyb motora žiadanou rýchlosťou a zrýchlením na žiadanú polohu a vykonávať ďalšie akcie, ktoré sú popísané nižšie.



Obr. 31: Užívateľské rozhranie aplikácie

Chod programu sa skladá z viacerých fáz (obr. 32). Prvou je inicializácia, potom nasleduje samotná riadiaca slučka a poslednou je ukončovacia fáza. Prvá fáza spočívala v nasledujúcich krokoch vykonávaných v „Init.vi“:

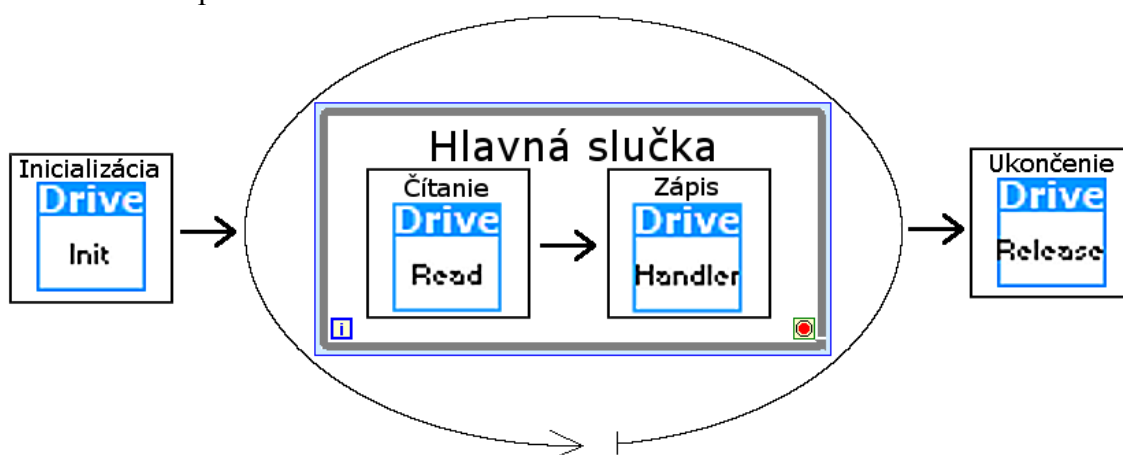
- 1) Prepnutie Scan Engine do konfiguračného módu a nastavenie skenovacej periódy.



- 2) Inicializácia EtherCAT komunikácie (Nájdenie pripojených master a slave zariadení a ich resetovanie).
- 3) Vymazanie predošlých chýb a prepnutie Scan Engine do aktívneho módu.
- 4) Vytvorenie špecifickej referencie na os pomocou „Open.vi“ z objektu „SDI – HIWIN“, pomocou ktorej je následne prepnutý plug-in mód do aktívneho stavu.
- 5) Vytvorenie pohybovej referencie „Straight-Line Move“ a vymazanie chýb.

Ďalej nasleduje cyklická časť programu, ktorá sa nachádza v časovej slučke zosynchronizovanej so „Scan Engine“ periódou. Skladá sa z čítacej časti obsiahnutej v „Read.vi“, ktorá vracia aktuálnu pozíciu, stav riadiacej jednotky a pohybu. Druhou časťou je kontrola pohonu, teda zapisovacia časť, ktorú zabezpečuje „Handler.vi“. Slúži pre vykonanie referenčného pohybu, pohybu na žiadanú polohu žiadanou rýchlosťou a zrýchlením, zastavenie pohybu alebo vymazanie chýb.

Poslednú fázu programu má na starosti „Release.vi“. Táto časť programu sa vykoná po stlačení tlačidla „STOP“. Zastaví pohyb motora, pokiaľ je nejaký pohyb vykonávaný, odbudí motor a deaktivuje riadiacu jednotku. Následne odstráni vytvorené referencie na pohyb, zmení stav plug-in a „Scan Engine“ módu na konfiguračný a ukončí celú aplikáciu.



Obr. 32: Zjednodušená schéma programu

### 7.3 Verifikácia presnosti pohybu

Pri overovaní presnosti s akou dokáže regulátor regulovať na žiadanú polohu, bolo vykonaných niekoľko cyklov skúšok. Motor bol otestovaný vo vybraných hodnotách rýchlosti, zrýchlenia a ryvu v celom spektre dosiahnuteľných hodnôt týchto veličín a za rôznych dĺžok pohybových dráh. Všetky testy boli vykonané bez záťaže motora (len jeho vlastná hmotnosť), čo možno skresľuje výsledok tohto merania, ale keďže v tejto práci nebola pridelená žiadna reálna aplikácia tomuto pohonu, sú tieto merania postačujúce.

Meraním sa zistilo, že regulátor dokáže regulovať s nulovou chybou pri rozlíšení odmeriavania 1  $\mu\text{m}$  pri žiadanej hodnote rýchlosti, zrýchlenia, ryvu a polohy. Výsledkom je teda, že reálna chyba polohy dosahuje hodnoty opakovateľnosti polohy použitého odmeriavania. Z dôvodu, že nebola nameraná žiadna chyba pri pohybe na žiadanú polohu, nie sú uvedené žiadne grafy reprezentujúce toto meranie, pretože ich prítomnosť by bola bezvýznamná.



## 8 ZÁVER

V tejto práci sú spracované poznatky o lineárnych motoroch, ich delení a princípu činnosti lineárnych synchronných motorov, ktoré boli následne využité v tejto práci. Ďalej sa práca okrajovo venuje zbernici EtherCAT, ktorá bola využitá pre komunikáciu v riadiacom systéme. Rovnako bola spracovaná problematika použitia softvérového modulu NI SoftMotion, ktorý bol následne využitý pre vytvorenie programu pohybovej aplikácie.

Keďže sa táto práca zaoberá riadením lineárneho pohonu HIWIN na platforme NI Compact RIO pomocou frekvenčného meniča D1-N rovnako od firmy HIWIN, sú ďalej objasnené ich funkcie v danom riadiacom systéme a ich technické parametre. Následne práca popisuje konfiguráciu a nastavenie regulácie pohonu pomocou softvéru Lightning. Poslednou časťou práce je samotná pohybová aplikácia, ktorá bola vytvorená pomocou vývojového prostredia NI LabVIEW a modulu NI SoftMotion. Popisuje všetky kroky pri vytváraní daného projektu v LabVIEW a princíp vytvorenej pohybovej aplikácie. Nakoniec je zhodnotená presnosť pohybu osi.

Výsledkom tejto práce je zostavený a nakonfigurovaný riadiaci systém pre riadenie daného motora, ktorý je ovládaný pomocou softvérovej aplikácie. Bol dosiahnutý aj cieľ práce, ktorým bolo doplniť chýbajúcu podporu frekvenčného meniča v NI SoftMotion. Výstupom je rovnako aj aplikácia, ktorá poskytuje užívateľské rozhranie, v ktorom je možné pozorovať graficky zobrazenú aktuálnu polohu motora, stav pohybu a stav riadiacej jednotky. Rozhranie poskytuje užívateľovi ovládať pohyb motora žiadanou rýchlosťou a zrýchlením na žiadanú polohu.



## 9 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] Hiwin s.r.o. Katalogy 2013. Polohovací systémy lineární osy. Brno: Hiwin, 2013.
- [2] ROMAN, J. Řízení lineárních pohonů HIWIN. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 65s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Houška, Ph.D.
- [3] CHEVAILLER, S. Comparative study and selection criteria of linear motors. Lausanne, 2006. Disertační práce. ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE. Vedoucí práce Prof. M. Jufer.
- [4] OTTEN, G. et al. Linear Motor Motion Control Using a Linear Feedforward Controller. IEEE/ASME Transactions on mechatronic. 1997, Vol. 2, no. 3, ISSN 1083-4435.
- [5] SUNG, Whan Youn, Jin Lee JONG, Sung Yoon HEE a Seop Koh CHANG. A New Cogging-Free Permanent-Magnet Linear Motor. A New Cogging-Free Permanent-Magnet Linear Motor [online]. 2008, roč. 44, č. 7 [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=04544938>
- [6] EtherCAT Technology Group | EtherCAT [online]. Nuremberg: EtherCAT Technology Group, 2016 [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <https://www.ethercat.org/en/technology.html>
- [7] EtherCAT Technology Group [online]. Nuremberg: EtherCAT Technology Group, 2017 [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <https://www.ethercat.org/default.htm>
- [8] NI SoftMotion Module Help [online]. Austin: National Instruments, 2013 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371093P-01>
- [9] Building an NI Motion Control System [online]. Austin: National Instruments, 2016 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/12127/en>
- [10] Using the NI Scan Engine (Real-Time, Windows) [online]. Austin: National Instruments, 2013 [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: [http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361K-01/lvioscanhelp/scan\\_engine](http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361K-01/lvioscanhelp/scan_engine)
- [11] LMS13 Linear Motor. In: *HIWIN MIKROSYSTEM* [online]. Taichung: HIWIN MIKROSYSTEM, 2015 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.hiwinmikro.tw/hiwintree/Upload/LM/LMS%20PDF/LMS13.pdf>
- [12] Inductive Sensor with Standard Switching Distances. In: *Wenglor sensoric elektronische Geraete GmbH* [online]. Tettang: wenglor sensoric, 2017 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: [https://www.wenglor.com/fileadmin/functions/wdm.php?dfile=IH020BK41VD.PDF&pfa d=fileadmin/download/DATA\\_SHEETS/EN/&sfile=Data\\_sheet\\_IH020BK41VD.pdf&zip=false](https://www.wenglor.com/fileadmin/functions/wdm.php?dfile=IH020BK41VD.PDF&pfa d=fileadmin/download/DATA_SHEETS/EN/&sfile=Data_sheet_IH020BK41VD.pdf&zip=false)
- [13] Assembly and Commisioning Instructions D1-N Servo Drive Amplifier. In: *Servo drive D1-N* [online]. Offenburg: HIWIN, 2017 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <https://www.hiwin.de/en/Products.html&downloadLink=share/public/Downloads/Montageanleitungen/Antriebsverstaerker/D1N-02-3-EN-1610-MA.pdf>
- [14] CRIO-9022 [online]. Austin: National Instruments, 2017 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.ni.com/cs-cz/support/model.crio-9022.html>



## **10 ZOZNAM PRÍLOH**

CD (obsahujúce elektronickú verziu práce a vypracovaný program)